

**Analyse der lokalen Auswirkungen des Klimawandels  
und Ableitung von Planungshinweisen für die  
Klimaanpassung am Beispiel der Stadt Jena**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium  
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt dem Rat der Chemisch-Geowissenschaftlichen Fakultät der  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Diplom-Geograph Uwe Kurmutz  
geboren am 23.12.1975 in Jena

Gutachter:

1. Prof. Dr. Roland Mäusbacher (Institut für Geographie, Lehrstuhl Physische Geographie, Friedrich-Schiller-Universität Jena)
2. Prof. Dr. Dieter Scherer (Institut für Ökologie, Fachgebiet Klimatologie, Technische Universität Berlin)

Tag der öffentlichen Verteidigung: 10.05.2017

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2013-2016 und fußt auf dem Projekt „JenKAS - Jenaer KlimaAnpassungsStrategie“, an dem ich im Zeitraum 2009-2012 beim Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz (ThINK) gearbeitet habe. Für die Anregung zum Thema und die langjährige Unterstützung gebührt Herrn PD Dr. Martin Gude herzlicher Dank.

Meinen Gutachtern Herrn Prof. Dr. Roland Mäusbacher und Herrn Prof. Dr. Dieter Scherer danke ich für die wissenschaftliche Betreuung und die kritischen Hinweise zur Arbeit.

Für die Durchsicht des Manuskripts und die zahlreiche konstruktive Kritik bin ich Herrn Dr. Matthias Reiche und Frau Anja Pluciennik zu großem Dank verpflichtet. Herrn Dr. Ralf Bischoff, Herrn Jakob Maercker und Herrn Daniel Knopf danke ich für die anregende fachliche Diskussion während der Erstellung der Arbeit.

Ohne Datengrundlagen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Für die Bereitstellung der Daten bin ich deshalb der Stadt Jena und ihren Eigenbetrieben, der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG), der Thüringer Klimaagentur, dem Thüringer Landesamt für Vermessung und Geoinformation (TLVermGeo), dem ThüringenForst, dem Max-Planck-Institut für Biogeochemie sowie dem Deutschen Wetterdienst zu Dank verpflichtet.

Für zusätzliche Motivation und praktische Ratschläge in der Schlussphase der Dissertation danke ich Anna, Evi, Heike sowie Jedda und wünsche ihnen gleichzeitig viel Kraft für ihre eigenen Arbeiten.

Meinen KollegInnen beim Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz (ThINK) danke ich für die Unterstützung und die Möglichkeit, die Dissertation parallel zu meiner Arbeit am Institut anfertigen zu können.

Ein herzlicher Dank gilt meinen Eltern, mit deren voller Unterstützung ich jederzeit rechnen konnte, sowie Anja für ihre Geduld und Hilfe im schwierigen letzten Jahr.





---

## Kurzzusammenfassung

Ziel der Arbeit ist es, einen Beitrag zur Methodenentwicklung im Bereich der Klimafolgenanalyse und der Ableitung von Planungshinweisen zur Klimaanpassung im urbanen Raum zu liefern. Zahlreiche Beobachtungen zeigen, dass sich das Klima auf der Erde seit Mitte des 20. Jahrhunderts signifikant verändert. Es ist breiter wissenschaftlicher Konsens, dass der Mensch diese Veränderungen herbeigeführt hat. Urbane Räume spielen aufgrund der Konzentration von Menschen, Infrastrukturen und Wirtschaftsaktivitäten eine besondere Rolle in Bezug auf den Klimawandel. Viele kommunale Handlungsfelder sind direkt oder indirekt von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Die Raumplanung spielt eine Schlüsselrolle bei der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels, denn Stadtplaner können mit Hilfe rechtlicher Instrumente die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen befördern.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadt Jena wurden anhand der Klimawirkungen *Wärmebelastung für die Bevölkerung, Trockenstress für die Vegetation* sowie *Überschwemmungen durch Starkregen* für die Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 untersucht. Für die Gegenwart (1981-2010) erfolgte dies auf Ebene der 41 statistischen Bezirke Jenas. Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit wurden die zukünftigen Klimawirkungen anhand der Entwicklung von Klimasignal und Sensitivität qualitativ für die Gesamtstadt beschrieben und nicht räumlich aufgelöst. Die Trendanalyse ergab, dass für alle Klimawirkungen eine Verstärkung künftig wahrscheinlich ist. Die daraus erwachsenden Herausforderungen sind nicht neuartig, sondern ergeben sich aus Veränderungen der Intensität und Häufigkeit bekannter, bereits heute bestehender, Problemlagen. Für die Klimawirkungen wurden Anpassungsziele definiert, Handlungsempfehlungen vorgelegt und in einer *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* verortet. Es zeigt sich, dass viele städtische Bereiche existieren, in denen sich Klimawirkungen räumlich überlagern. Diese Flächen finden sich insbesondere in den verdichteten Stadtbereichen Jenas. Hier sollten Anpassungsmaßnahmen vorrangig umgesetzt werden.

Das vorgestellte methodische Konzept stellt einen konsistenten Ansatz dar, um Klimawirkungen auf städtischer Ebene zu bestimmen und Planungshinweise abzuleiten. Die verwendeten Methoden können mit geringem Aufwand auf andere urbane Räume übertragen werden. Die Qualität der Ergebnisse hängt jedoch von den verfügbaren Eingangsdaten ab. Künftig sollte die Etablierung von Standards der Quantifizierung und Bewertung von Klimawirkungen vorrangige Aufgabe sein. Für die Operationalisierung künftiger Klimawirkungen sind Szenarien zur Entwicklung der Sensitivitäten unabdingbar, diese fehlen bisher größtenteils.



## Abstract

The objective of this study is to contribute to the development of methods to assess the impacts of climate change on the local scale, and aid urban planners in adapting to said impacts. There is evidence for a worldwide change in climatic conditions since the mid of last century, also that man is causing this change due to massive emissions of greenhouse gases into the atmosphere. Urban areas have a high vulnerability to climate change impacts as a result of the spatial concentration of people, infrastructures and economic activities, and especially most parts of the public sector are affected by these impacts. Spatial planning plays a key role in climate change adaptation since urban planners can promote adaptation measures by integrating them into local plans.

The effect of climate change on the city of Jena was analyzed for climate impacts *heat stress for the population*, *drought stress for the urban vegetation* and *pluvial flooding* for periods 1981-2010 and 2071-2100. Studies for 1981-2010 were carried out on a statistical district level. Due to a lack of reliable spatial data impacts for 2071-2100 could only be assessed by trend analysis of climate and sensitivity data for the city as a whole. The results show that all studied impacts are likely to increase over the course of the century. Challenges arising from these impacts are not of a new type, but caused by changes of magnitude and frequency of existing problems. Objectives were defined, counter measures provided, and located on a recommendation map with planning instructions to address the local impacts of climate change. It is evident that there are many urban areas, where different impacts overlap. These areas are mainly found in inner city and commercial districts. Implementation of adaptation measures there should take precedence over other affected areas.

The presented methods demonstrate a consistent approach to assess climate change impacts on the local scale and, also, derive recommendations for urban planning. The methods used can easily be transferred to other urban areas, though the quality of the results depends on available input data. Future research should focus on establishing standards for quantification and assessment of climate change impacts, as well as the development of long-term sensitivity scenarios for the operationalization of future impacts.



---

# Inhalt

<b>Vorwort .....</b>	<b>I</b>
<b>Kurzzusammenfassung .....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungen .....</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellen .....</b>	<b>XV</b>
<b>1. Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Relevanz .....	1
1.2 Motivation und Ziel der Arbeit .....	2
1.3 Fragestellungen und Thesen .....	2
<b>2. Grundlagen und Forschungsstand .....</b>	<b>4</b>
2.1 Stadtklima .....	4
2.1.1 Entwicklung des Forschungsgebietes .....	4
2.1.2 Charakteristika des Stadtklimas .....	6
2.2 Anthropogener Klimawandel .....	13
2.2.1 Globale klimatische Veränderungen .....	13
2.2.2 Auswirkungen auf urbane Räume .....	15
2.3 Raumplanung und Stadtklima .....	18
2.3.1 Bedeutung der Raumplanung für die Klimaanpassung .....	18
2.3.2 Klimakarten für die Stadtplanung .....	20
2.4 Wärmebelastung für die Bevölkerung .....	23
2.4.1 Auswirkungen von Wärmebelastung .....	23
2.4.2 Verstärkung durch Hitzewellen, Klimawandel und Überalterung .....	25
2.4.3 Operationalisierung .....	27
2.5 Trockenstress für die Vegetation .....	30
2.5.1 Auswirkungen von Trockenstress .....	30
2.5.2 Verstärkung durch den Klimawandel .....	32
2.5.3 Operationalisierung .....	35
2.6 Überschwemmungen durch Starkregen .....	40
2.6.1 Auswirkungen von Überschwemmungen .....	40
2.6.2 Verstärkung durch den Klimawandel .....	43
2.6.3 Operationalisierung .....	45

<b>3. Untersuchungsgebiet.....</b>	<b>50</b>
3.1 Naturraum, Landnutzung und Demographie.....	50
3.2 Lokalklima .....	52
<b>4. Methoden.....</b>	<b>56</b>
4.1 Ausgangslage .....	56
4.2 Konzeptioneller Rahmen.....	57
4.3 Anpassung des Ansatzes für Jena .....	62
4.3.1 Klimasignal .....	62
4.3.2 Sensitivität.....	62
4.3.3 Klimawirkung der Gegenwart.....	63
4.3.4 Künftige Klimawirkung .....	67
4.4 Stationsbezogene Auswertung .....	69
4.5 Wärmebelastung für die Bevölkerung .....	69
4.5.1 Klimasignal .....	70
4.5.2 Sensitivität.....	70
4.5.3 Klimawirkung der Gegenwart.....	74
4.5.4 Künftige Klimawirkung .....	75
4.6 Trockenstress für die Vegetation .....	76
4.6.1 Klimasignal .....	77
4.6.2 Sensitivität.....	79
4.6.3 Klimawirkung der Gegenwart.....	83
4.6.4 Künftige Klimawirkung .....	87
4.7 Überschwemmungen durch Starkregen .....	88
4.7.1 Klimasignal .....	89
4.7.2 Sensitivität.....	89
4.7.3 Klimawirkung der Gegenwart.....	94
4.7.4 Künftige Klimawirkung .....	95
4.8 Gesamtklimawirkung.....	96
4.9 Planungshinweise zur Klimaanpassung .....	99
4.9.1 Datenaufbereitung .....	99
4.9.2 Zielstellungen und Handlungsempfehlungen.....	103
4.9.3 Planungshinweiskarte Klimaanpassung .....	104
<b>5. Ergebnisse .....</b>	<b>105</b>
5.1 Stationsbezogene Auswertung .....	105
5.2 Wärmebelastung für die Bevölkerung .....	110
5.2.1 Klimasignal .....	110
5.2.2 Sensitivität.....	111

---

5.2.3	Klimawirkung der Gegenwart.....	111
5.2.4	Künftige Klimawirkung.....	111
5.3	Trockenstress für die Vegetation.....	117
5.3.1	Klimasignal.....	117
5.3.2	Sensitivität.....	121
5.3.3	Klimawirkung der Gegenwart.....	122
5.3.4	Künftige Klimawirkung.....	126
5.4	Überschwemmungen durch Starkregen.....	128
5.4.1	Klimasignal.....	128
5.4.2	Sensitivität.....	129
5.4.3	Klimawirkung der Gegenwart.....	130
5.4.4	Künftige Klimawirkung.....	130
5.5	Gesamtklimawirkung.....	134
5.5.1	Gegenwart.....	134
5.5.2	Künftige Entwicklung.....	136
5.6	Planungshinweise zur Klimaanpassung.....	138
5.6.1	Flächenkulisse.....	138
5.6.2	Handlungsempfehlungen .....	146
5.6.3	Planungshinweiskarte .....	147
<b>6.</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>150</b>
6.1	Datenbasis.....	150
6.2	Methoden .....	152
6.3	Klimawirkungen .....	156
6.4	Planungshinweise .....	166
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>172</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>179</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>209</b>





## Abbildungen

Abbildung 1: Lufttemperaturunterschied zwischen London und dem Umland .....	4
Abbildung 2: Zeitabhängige Temperaturabweichung zwischen Stadt und Umland .....	9
Abbildung 3: Ausprägung der maximalen städtischen Wärmeinselintensität für verschiedene Kulturräume .....	10
Abbildung 4: Luftschichtung über Städten.....	13
Abbildung 5: Beobachtete Oberflächentemperaturveränderung zwischen 1901 und 2012 .....	14
Abbildung 6: Projizierte Veränderung der Erdoberflächentemperatur und des Niederschlags .....	15
Abbildung 7: Eingangsdaten für Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten .....	22
Abbildung 8: Ermittlung des Hitzestresses mit ENVI-met .....	28
Abbildung 9: Ermittlung der Hitzevulnerabilität mittels Indikatorenansatz .....	29
Abbildung 10: Klimahülle für die Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> ) .....	38
Abbildung 11: Klima-Arten-Matrix für Stadtbaumarten.....	40
Abbildung 12: Einfluss der Urbanisierung auf verschiedene Komponenten des Wasserkreislaufes.....	42
Abbildung 13: Veränderung der Wiederkehrzeit von Starkniederschlägen.....	44
Abbildung 14: Starkregenabflussmodellierung mit r.sim.water .....	48
Abbildung 15: Untersuchungsgebiet Stadt Jena.....	51
Abbildung 16: Saaletalwind und Regionalwind im Bereich Jena .....	54
Abbildung 17: Kaltluftsituation während autochthoner Wetterlagen im Stadtgebiet Jena.....	55
Abbildung 18: Konzept der Vulnerabilitätsbewertung des IPCC.....	58
Abbildung 19: Konzept der Vulnerabilitätsbewertung des Netzwerkes Vulnerabilität.....	59
Abbildung 20: Modifiziertes Konzept zur Vulnerabilitätsbewertung für die Stadt Jena.....	61
Abbildung 21: Struktur eines hierarchischen Vulnerabilitätsindex mit Subindizes .....	64
Abbildung 22: Klassifizierung und Bewertung von Klimasignalen, Sensitivitäten und Klimawirkungen mittels Standardabweichung.....	67
Abbildung 23: Aggregation der Variablen und Indikatoren zur Klimawirkung Wärmebelastung für die Bevölkerung .....	74
Abbildung 24: Anteile der Hauptbaumarten auf Waldflächen im Jenaer Stadtgebiet .....	81
Abbildung 25: Anteile der Gattungen der Jenaer Stadtbäume .....	83
Abbildung 26: Aggregation der Variablen, Indikatoren und Teilklimawirkungen zur Klimawirkung Trockenstress für die Vegetation.....	86
Abbildung 27: Überschwemmungsmodellierung mit r.sim.water.....	93
Abbildung 28: Aggregation der Variablen und Indikatoren zur Klimawirkung Überschwemmungen durch Starkregen .....	95
Abbildung 29: Entwicklung der mittleren Jahres-, Sommer- und Winterlufttemperatur für den Zeitraum 1824-2100 an der DWD-Station Jena-Sternwarte.....	106

---

Abbildung 30: Entwicklung des mittleren Jahres-, Sommer- und Winterniederschlags an der DWD-Station Jena-Sternwarte.....	106
Abbildung 31: Entwicklung der mittleren klimatischen Wasserbilanzen für Sommer- und Winterhalbjahr sowie das Gesamtjahr an der DWD-Station Jena-Sternwarte.....	108
Abbildung 32: Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von Sommertagen und Heißen Tagen an der DWD-Station Jena-Sternwarte .....	108
Abbildung 33: Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von Frosttagen und Eistagen an der DWD-Station Jena-Sternwarte .....	109
Abbildung 34: Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von Starkregentagen und Extremregentagen an der DWD-Station Jena-Sternwarte.....	109
Abbildung 35: Mittlere jährliche Anzahl Heißer Tage im Untersuchungsgebiet Jena.....	110
Abbildung 36: Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung der Wärmebelastung für die Bevölkerung auf Ebene der statistischen Bezirke .....	112
Abbildung 37: Veränderung der maximalen täglichen bodennahen Lufttemperatur .....	113
Abbildung 38: Veränderung der Anzahl an Tagen mit einer Maximaltemperatur über dem 90. Perzentil der Gegenwart (1981-2010) .....	114
Abbildung 39: Veränderung der mittleren jährlichen Anzahl Heißer Tage.....	115
Abbildung 40: Entwicklung der Bevölkerung .....	116
Abbildung 41: Prozentuale Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche .....	117
Abbildung 42: Mittlere klimatische Wasserbilanz in der ackerbaulichen Vegetationsperiode.....	118
Abbildung 43: Mittlere klimatische Wasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit .....	119
Abbildung 44: Klimasignale für die Trockenstress-Teilklimawirkungen Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume auf Ebene der statistischen Bezirke.....	120
Abbildung 45: Sensitivitäten für die Trockenstress-Teilklimawirkungen Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume auf Ebene der statistischen Bezirke.....	123
Abbildung 46: Teilklimawirkungen und Gesamtklimawirkung des Trockenstresses für die Vegetation auf Ebene der statistischen Bezirke.....	124
Abbildung 47: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz in der ackerbaulichen Vegetationsperiode .....	126
Abbildung 48: Veränderung der klimatischen Wasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit .....	127
Abbildung 49: Veränderung der maximalen Länge von Trockenperioden .....	128
Abbildung 50: Mittleres Sturzflutpotenzial konvektiver Zellkerne im Sommerhalbjahr .....	129
Abbildung 51: Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung für Überschwemmungen durch Starkregen auf Ebene der statistischen Bezirke .....	131
Abbildung 52: Veränderung der mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit einem Niederschlag ab 20 mm.....	132
Abbildung 53: Veränderung der mittleren jährlichen Niederschlagssumme aller Tage mit einem Niederschlag über dem 99. Perzentil.....	133

---

Abbildung 54: Absolute, relative und kombinierte Gesamtklimawirkung auf Ebene der statistischen Bezirke .....	135
Abbildung 55: Kurzcharakterisierung eines statistischen Bezirks in Bezug auf vorhandene Klimawirkungen .....	136
Abbildung 56: Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung der Wärmebelastung für die Bevölkerung auf Ebene der Einzelflächen.....	140
Abbildung 57: Teilklimawirkungen für die drei Teilaspekte des Trockenstresses für die Vegetation und kombinierte Gesamtklimawirkung auf Ebene der Einzelflächen .....	141
Abbildung 58: Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung für Überschwemmungen durch Starkregen auf Ebene der Einzelflächen.....	143
Abbildung 59: Priorisierung von Flächen mit überdurchschnittlicher Klimawirkung.....	144
Abbildung 60: Kartografische Aufbereitung der priorisierten Flächenkulissen der Klimawirkungen .....	145
Abbildung 61: Planungshinweiskarte Klimaanpassung für die Stadt Jena: verkleinerte Gesamtansicht.....	148
Abbildung 62: Planungshinweiskarte Klimaanpassung für die Stadt Jena: vergrößerte Detailansicht .....	149



## Tabellen

Tabelle 1: Charakteristika des Stadtklimas einer Großstadt in den mittleren Breiten im Vergleich zum unbebauten Umland .....	8
Tabelle 2: Klimawirkungen in urbanen Handlungsfeldern.....	17
Tabelle 3: Hitzewellenereignisse und damit verbundene Mortalität in Europa.....	25
Tabelle 4: Ansätze zur Gefährdungsanalyse von Überschwemmungen im urbanen Raum .....	45
Tabelle 5: Übersicht über die verwendeten klimatologischen Kenntage .....	52
Tabelle 6: Klimatische Abweichungen zwischen Jenaer Innenstadt und Umland .....	53
Tabelle 7: Elemente des angepassten Vulnerabilitätskonzepts.....	59
Tabelle 8: Variablen zur Beschreibung der hitzesensitiven Bevölkerung .....	73
Tabelle 9: Zuordnung von Bodenfeuchtestufen des ThüringenForstes zu Standortbereichen der KLAM-Wald.....	81
Tabelle 10: Ermittelte Kennwerte für die thermische Vegetationsperiode und die klimatische Wasserbilanz in der thermischen Vegetationsperiode .....	121
Tabelle 11: Klimawirkungen in den statistischen Bezirken Jena.....	137
Tabelle 12: Künftige Entwicklung von Klimasignal, Sensitivität und Klimawirkung für die untersuchten Klimawirkungen in Jena.....	138
Tabelle 13: Zielstellungen und Handlungsempfehlungen für die Klimawirkungen in Jena ..	146
Tabelle 14: In der Arbeit verwendete Daten.....	209
Tabelle 15: Empfohlene Anpassungsmaßnahmen für die Klimawirkungen in der Planungshinweiskarte .....	211



# 1. Einführung

## 1.1 Problemstellung und Relevanz

Dass Städte sich klimatisch von ihrem Umland abheben und ein eigenes charakteristisches Stadtklima entwickeln, wurde spätestens durch den englischen Chemiker Luke Howard in ersten systematischen Temperaturmessungen in London im frühen 19. Jahrhundert belegt (KUTTLER 2004a). Jede Art von Bebauung übt einen Einfluss auf die verschiedenen Klimaelemente (Temperatur, Niederschlag und Wind) aus, welcher mit der Ausdehnung der Stadt zunimmt (KUTTLER 2004b). Des Weiteren unterliegen der Strahlungs- und Wärmehaushalt, der Luftaustausch, die hygrischen Verhältnisse sowie das Bioklima Veränderungen zum städtischen Umland. Die negativen Folgen des Stadtklimas sind heute bekannt und werden seit Jahrzehnten in der räumlichen Planung berücksichtigt (REN 2015).

Der Weltklimarat geht weltweit von einer tendenziellen Steigerung der mittleren globalen Lufttemperatur infolge des anthropogen verursachten Klimawandels aus (IPCC 2014d). Auch für die Bundesrepublik Deutschland und den Freistaat Thüringen wird mit einem Anstieg der mittleren Jahrestemperatur gerechnet (TMLFUN 2013, SCHÖNTHALER et al. 2015). Lokale Auswirkungen sind Veränderungen der thermischen Verhältnisse in der Stadt (GRIMMOND 2007, HAJAT et al. 2010). Gleichzeitig verändern die höheren Lufttemperaturen die klimatische Wasserbilanz und damit die Wachstumsbedingungen für die städtische Vegetation. Des Weiteren ist von einer Intensivierung und Häufung von Extremereignissen auszugehen (IPCC 2014a). Konvektive Starkniederschläge führen zu Hochwässern an kleinen Vorflutern, Überschwemmungen auf Straßen und erosiven Sturzfluten auf stadtnahen Ackerflächen.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den urbanen Raum erfordern eine Antwort der städtischen Akteure, allen voran der Stadtplanung und Stadtentwicklung. Planerisches Handeln kann eine Verringerung der Vulnerabilität städtischer Strukturen und eine Erhöhung der Resilienz der Stadt gegenüber Klimawirkungen erzielen (WILSON 2006, STERN 2007). Hierfür müssen die Auswirkungen des lokalen Klimawandels räumlich differenziert und für die städtischen Akteure verständlich aufbereitet werden. Gleichzeitig benötigen die Akteure Handlungsempfehlungen, wie diesen Herausforderungen zu begegnen ist. Nur wenn die lokalen Akteure wissen, welche räumlichen Auswirkungen der Klimawandel (mit)verursacht, welche Anpassungsmöglichkeiten nutzbar sind und mittels welcher Instrumente diese umzusetzen sind, kann der Anpassungsprozess auf lange Sicht erfolgreich sein.

## **1.2 Motivation und Ziel der Arbeit**

Die Motivation der Dissertation liegt einerseits in der aktuellen gesellschaftlichen Bedeutung des Klimawandels, dessen Auswirkungen auf urbane Räume sowie der daraus folgenden Anpassung daran. Andererseits hält die Interdisziplinarität von Klimatologie, Geoinformatik und Raumplanung eine große Bandbreite an Inhalten und Methoden bereit. Die Tätigkeit am Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz (ThINK) gab dem Autor detaillierte Einblicke in die Anpassungspraxis auf regionaler und kommunaler Ebene. Hierbei wurde deutlich, welche Bedürfnisse und Probleme sich auf kommunaler Seite bei der Klimaanpassung ergeben. Adäquate Arbeitsgrundlagen für den Prozess der Klimaanpassung auf städtischer Ebene zu schaffen, ist ein wesentliches Ziel dieser Dissertation.

Die Dissertation fußt auf dem Forschungsprojekt „JenKAS – Jenaer Klima-Anpassungs-Strategie“ als Teil des Forschungsfeldes "Urbane Strategien zum Klimawandel – Kommunale Strategien und Potenziale" des Forschungsprogramms "Experimenteller Wohnungs- und Städtebau" (ExWoSt) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). In diesem Rahmen begleitete das Thüringer Institut für Nachhaltigkeit und Klimaschutz (ThINK) als lokale Forschungsassistentin die Stadt Jena zwischen Dezember 2009 und November 2012 und erarbeitete inhaltliche und methodische Grundlagen.

Ziel der Dissertation ist es, einen Beitrag zur Methodenentwicklung im Bereich der Klimafolgenanalyse und der Ableitung von Planungshinweisen zur Klimaanpassung im urbanen Raum, am Beispiel der Stadt Jena, zu liefern. Hierbei soll mit Hilfe frei verfügbarer Daten und unter Verwendung eines Geoinformationssystems (GIS) Klimawirkungen, die durch den anthropogenen Klimawandel verstärkt werden, herausgearbeitet und räumlich differenzierte Planungshinweise abgeleitet werden. Zugleich sollen die erarbeiteten Methoden auf andere urbane Untersuchungsgebiete übertragbar sein.

## **1.3 Fragestellungen und Thesen**

Aus der Problemstellung ergeben sich drei übergeordnete Fragestellungen, die anhand von vertiefenden Forschungsfragen in der Dissertation untersucht werden sollen:

- (1) Wie kann eine kommunale Klimawirkungsanalyse durchgeführt werden?
  - a. Welche Daten sind als Basis für die Analyse geeignet und verfügbar?



- b. Welche Methoden ermöglichen eine räumlich differenzierte Analyse auf lokaler Ebene?
- (2) Welche Auswirkungen hat der anthropogene Klimawandel auf Jena?
  - a. Welches sind die bedeutendsten Auswirkungen auf die Stadt?
  - b. Ergeben sich durch diese Auswirkungen neuartige Herausforderungen?
- (3) Wie sollte den Auswirkungen des Klimawandels begegnet werden?
  - a. In welchen städtischen Bereichen besteht der größte Handlungsbedarf?
  - b. Wie können Planungshinweise zur Klimaanpassung an Stadtplaner und städtische Akteure vermittelt werden?

Aus den Forschungsfragen ergeben sich folgende Thesen:

- (1) Durchführung der Klimawirkungsanalyse:
  - a. Frei zugängliche Klima- und Fachdaten eignen sich für kommunale Klimawirkungsanalysen.
  - b. Geoinformationssysteme in Verbindung mit indikatorbasierten Ansätzen sind geeignet, die lokalen Auswirkungen des Klimawandels räumlich differenziert aufzuzeigen.
- (2) Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf Jena:
  - a. Die bedeutendsten Auswirkungen sind die Wärmebelastung für die Bevölkerung, sommerlicher Trockenstress für die Vegetation und Überschwemmungen aufgrund von Starkniederschlagsereignissen.
  - b. Die Herausforderungen dieser Auswirkungen sind nicht neuartig, sondern entstehen aus Veränderungen der Intensität und Häufigkeit bekannter, bereits heute bestehender, Problemlagen.
- (3) Umsetzung der Klimaanpassung:
  - a. Besonderer Handlungsbedarf besteht in den verdichteten Stadtbereichen, wo sich Klimawirkungen räumlich überlagern.
  - b. Eine Planungshinweiskarte zur Klimaanpassung ermöglicht die Vermittlung der räumlich differenzierten Handlungsbedarfe und Anpassungsoptionen an Stadtplaner und städtische Akteure.

## 2. Grundlagen und Forschungsstand

### 2.1 Stadtklima

#### 2.1.1 Entwicklung des Forschungsgebietes

Erste Arbeiten mit stadtklimatologischen Aspekten reichen bis in das Altertum zurück. Vitruvius (75 v. Chr. bis 26 v. Chr.) und Horaz (65 v. Chr. bis 8 v. Chr.) lieferten Erkenntnisse zur Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse bei der Stadtplanung sowie zur Luftverschmutzung im antiken Rom (YOSHINO 1990). Frühzeitig stand London im Fokus stadtklimatologischer Arbeiten, u. a. durch John Evelyn (1620-1706) mit Einzelstudien zur Luftverschmutzung, der Stadttemperatur und dem Stadtnebel (KUTTLER 2004a). Erste systematische Messungen erfolgten durch den Londoner Chemiker und Apotheker Luke Howard (1772-1864), der die thermischen Unterschiede zwischen London und seiner ländlichen Umgebung beschrieb (Abbildung 1). HOWARD (1833) lieferte in „The climate of London“ eine erste Erklärung für das Phänomen der städtischen Wärmeinsel. 1855 wies Renou eine städtische Wärmeinsel für Paris nach und Kremser 1886 eine für Berlin (HELBIG 2003). In der Folgezeit widmeten sich mehr Arbeiten dem Stadtklima und bald erschienen mit „Das Klima der bodennahen Luftschicht“ (GEIGER 1927) und „Das Stadtklima“ (KRATZER 1937) weitere Grundlagenwerke.

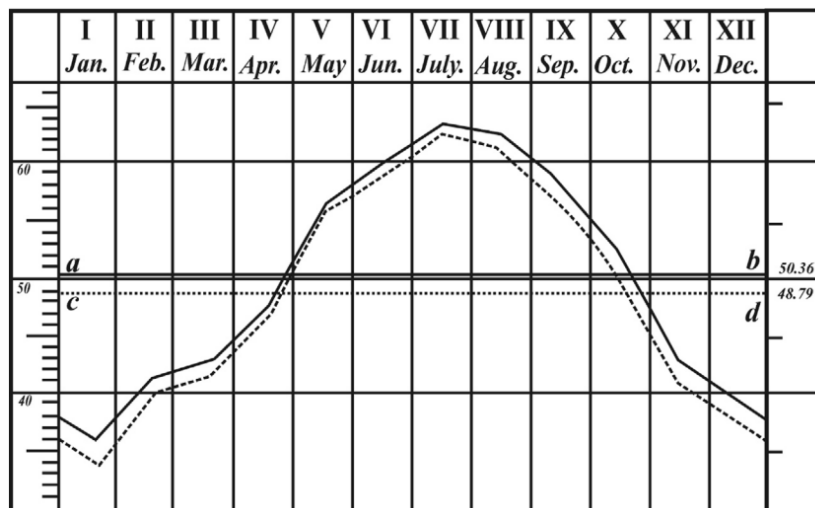


Abbildung 1: Lufttemperaturunterschied zwischen London und dem Umland. Vergleich der durch Luke Howard beobachteten niedrigeren Lufttemperatur im Umland (gestrichelte Linie) mit der von der Royal Society in London gemessenen höheren Lufttemperatur (durchgezogene Linie) (HOWARD 1833:5)

Lange beherrschten Arbeiten auf Basis umfangreicher Messungen das Thema (z. B. BALCHIN & PYE 1947, SUNDBORG 1950, CHANDLER 1965, LOWRY 1974). Bis etwa in die 1960er war die Mehrzahl der Arbeiten zur Erforschung des Stadtklimas von einer beschreibenden Klima-

tologie geprägt, die auf Basis von Beobachtungen der Wetterelemente auf der städtischen Maßstabsebene beruhte. Eine zunehmende Abstraktion zeigte OKE mit dem Zusammenhang zwischen dem Maximum der Wärmeinselintensität und der Stadtgröße (1973) bzw. der urbanen Geometrie auf (1981).

Seit den 1970ern rückten die Prinzipien der Erhaltung von Energie, Masse und Impuls in den Vordergrund und führten zu einer physikalisch ausgerichteten Klimatologie. TERJUNG (1970: 31) bemerkte, „*apparently no major attempts have been made to determine the energy-balance climatology of cities*“. Die Betrachtung der Energiebilanz städtischer Oberflächen verschob den Fokus von der Beschreibung von Phänomenen hin zu den zugrundeliegenden Prozessen und schuf eine Verbindung hin zur Grenzschicht-Meteorologie (MILLS 2014). Auch die zunehmende Luftverschmutzung durch anthropogene Aktivitäten gab der Stadtklimatologie eine größere Bedeutung (HELBIG 2003, JANKOVIĆ 2013). OKE (1976) definierte den *urban canopy layer* als untersten Bereich der städtischen Grenzschicht (*urban boundary layer*) bzw. als Raum zwischen der Erdoberfläche und der mittleren Gebäudehöhe in dem mikroskalige Prozesse, wie der Strahlungsaustausch zwischen Gebäudeoberflächen, im Vordergrund stehen (MILLS 2014). OKE (1978) gab mit „Boundary layer climates“ eine umfassende Übersicht über die Besonderheiten der atmosphärischen Grenzschicht.

Auf Basis der Geometrie von Straßen und deren entsprechendem thermischen Verhalten leitete OKE (1984) erste Empfehlungen für städtische Planungen ab. Zuvor hatte bereits LANDSBERG (1981) in „The urban climate“ neben der urbanen Luftqualität erste Planungsprobleme aufgegriffen. In den 1990er Jahre verstärkten sich die Forschungsaktivitäten zur Stadtklimatologie merklich. Einerseits wurde versucht, die Energiebilanz des Raumes zwischen Bodenschicht und Über-Dachniveau zu vervollständigen; andererseits ermöglichten leistungsfähigere Computer verbesserte numerische Simulationen bis in den mikroskaligen Bereich des *urban canopy layer* (MILLS 2014). Der Leistungszuwachs der Computer ermöglichte bald die Anwendung von Strömungsmodellen (*computational fluid dynamics, CFD*) auf ganze Stadtquartiere (z. B. BRUSE & FLEER 1998, HANNA et al. 2006). Hingegen sind die Validierung der Modelle an der städtischen Realität sowie die Übertragung der Ergebnisse in die Planungspraxis noch immer unterentwickelt (OKE 2006b). Eine praktische Anwendung dieser Ergebnisse erscheint jedoch dringend geboten, da bereits heute 54 % der Menschheit in urbanen Räumen lebt und sich dies bis 2050 auf 66 % erhöhen soll (DESA 2014). Vor dem Hintergrund des anthropogenen Klimawandels bedarf es künftig ebenso einer besseren Verknüpfung der Stadtklimatologie und der Klimafolgenforschung mit urbanem Fokus (HEBBERT &

JANKOVIĆ 2013, MILLS 2014). Die Weiterentwicklung des Forschungsgebietes wird durch zahlreiche Fachorganisationen (z. B. World Meteorological Organization, WMO; International Association for Urban Climate, IAUC; Fachausschuss Umweltmeteorologie, FA UMET, in der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, DMG), Fachkonferenzen (vgl. HELBIG 2003, JANKOVIĆ 2013) und diverse Fachzeitschriften (z. B. Meteorologische Zeitschrift, Atmospheric Environment, International journal of climatology, Urban climate) belegt. Umfangreiche Ausführungen zur historischen Entwicklung des Forschungsgebietes finden sich u. a. bei YOSHINO (1990), ARNFIELD (2003), HELBIG (2003), JANKOVIĆ (2013), MILLS (2014).

### **2.1.2 Charakteristika des Stadtklimas**

Als Stadtklima wird das durch die Wechselwirkung mit der städtischen Bebauung und deren Auswirkungen, inklusive der Abwärme und Emission von Luftverunreinigungen, modifizierte Klima verstanden (WMO 1983). Die Ursachen des Stadtklimas können auf makro-, meso- und mikroskalige Faktoren zurückgeführt werden. Als makroskalige Einflussgrößen sind zu nennen (KUTTLER 2004a):

- die geographische Breite bzw. die Klimazone,
- die Oberflächenformen und deren Beschaffenheit (Relief, Topografie),
- die räumliche Entfernung zu großen Wasserkörpern (See, Meer, Ozean).

Zu den meso- bis mikroskaligen Faktoren gehören:

- die flächenhafte Ausdehnung der Stadt bzw. der urbanen Agglomeration,
- die Anzahl der Einwohner,
- die Art und räumliche Anordnung der urbanen und ruralen Flächennutzungen,
- die kleinräumigen topografischen urbanen und ruralen Verhältnisse,
- die räumliche Verteilung und der Grad der Bodenversiegelung,
- die Stärke der dreidimensionalen Strukturierung des Stadtkörpers,
- das Ausmaß der Emission fester, flüssiger und gasförmiger Luftbeimengungen sowie fühlbarer und latenter Wärme.

Im Allgemeinen treten die makroskaligen hinter die meso- und mikroskaligen Faktoren zurück (WIENERT 2002). Wichtige Steuergrößen für das Stadtklima sind Größe und Struktur einer Stadt, die Energiebilanzen der städtischen Oberflächen, die auf den thermischen und hydrologischen Eigenschaften der Materialien beruhen, die räumliche Verteilung von

(un)versiegelten Flächennutzungen sowie die Emission von Wärme, Wasser und Luftverunreinigungen (KUTTLER 2004a).

Die thermischen Eigenschaften städtischer Oberflächen werden durch ihre Farbe, Zusammensetzung, Oberflächenrauigkeit, Versiegelungsgrad, Pflanzenbedeckung, Wasserversorgung und der Ausrichtung zum Strahlungseinfall bestimmt. Sie entscheiden über die Aufnahme, Speicherung sowie Abgabe von Energie und bestimmen somit die Strahlungsbilanz ( $Q^*$ ) und das thermische Mikroklima. Künstliche Materialien wie Asphalt, Beton, Stahl oder Backstein absorbieren und speichern viel Strahlungsenergie und geben diese erst zeitverzögert wieder an die Luft ab. Die hydrologischen Eigenschaften städtischer Oberflächen wie Abfluss, Infiltration, Verdunstung und Versickerung von Niederschlagswasser werden u. a. von Versiegelung, Gefälle, Porenvolumen, Porosität und Benetzungskapazität gesteuert. Dabei führen versiegelte Oberflächen zu erhöhtem Oberflächenabfluss, verringerter Infiltration und Versickerung sowie stark herabgesetzter Verdunstung (KUTTLER 2004a).

Die Produktion und Emission von Wärme in Städten erfolgt durch den Betrieb von Kraftfahrzeugen, Kraftwerken, Industrie/Gewerbe, die Gebäudeklimatisierung ( $Q_{anthr}$ ) und den Stoffwechsel der Stadtbewohner selbst ( $Q_{Met}$ ). Die daraus resultierenden Wärmestromdichten sind geprägt durch Einwohnerdichten und Pro-Kopf-Energieverbrauch und variieren mit Tages-, Wochen- und Jahreszeiten sowie Klimazone, Kulturräum, Stadtstruktur oder Wirtschaftslage. Luftverunreinigungen entstehen durch Verkehr, Industrie/Gewerbe, Klimatisierung, jedoch auch durch Biomasseverbrennung sowie Staub aus Wüstengebieten oder von winderosionsanfälligen Landwirtschaftsflächen. Gegenwärtig sind das vor allem Stickstoffoxide ( $NO_x$ ), Kohlenstoffoxide ( $CO_x$ ), Schwefeldioxid ( $SO_2$ ), Ozon ( $O_3$ ), Staub und Ruß sowie organische Verbindungen (NMVOC, PAK, Benzol) (KUTTLER 2004a).

Im Ergebnis führen die Einflussgrößen eigenständig oder im Zusammenspiel zu klimatischen Veränderungen im Stadtgebiet und damit zu Unterschieden zum unbebauten Umland. Die klimatischen Veränderungen sind umfassend und betreffen mehr oder weniger alle Klimaelemente. Tabelle 1 (S. 8) gibt einen zusammenfassenden Überblick über die genannten Veränderungen, bevor die einzelnen Komponenten nachfolgend näher erläutert werden.

**Tabelle 1: Charakteristika des Stadtklimas einer Großstadt in den mittleren Breiten im Vergleich zum unbebauten Umland (STEINRÜCKE et al. 2010:28)**

<b>Einflussgrößen</b>	<b>Veränderungen gegenüber Umland</b>	<b>Einflussgrößen</b>	<b>Veränderungen gegenüber Umland</b>
<i>Strahlungs- und Wärmehaushalt</i>		<i>Hygrische Verhältnisse</i>	
Sonnenscheindauer		Luftfeuchtigkeit	Geringe Unterschiede
- im Sommer	Bis -8 Prozent	Nebel	
- im Winter	Bis -10 Prozent	- Großstadt	Weniger
Globalstrahlung	Bis -10 Prozent	- Kleinstadt	Mehr
Albedo	Geringe Unterschiede	Niederschlag	
Gegenstrahlung	Bis +10 Prozent	- Regen	Mehr (leeseitig)
UV-Strahlung		- Schnee	Weniger
- im Sommer	Bis -5 Prozent	- Tauabsatz	Weniger
- im Winter	Bis -30 Prozent	Verdunstung	Weniger
Sensibler Wärmestrom	Bis +50 Prozent	<i>Austausch und Lüfthygiene</i>	
Wärmespeicherung im Stadtkörper	Bis +40 Prozent	Wind	
<i>Thermische Verhältnisse</i>		- Geschwindigkeit	Bis -20 Prozent
Lufttemperatur		- Richtungsböigkeit	Stark variierend
- Jahresmittel	Ca. +2 Kelvin	- Geschwindigkeitsböigkeit	Erhöht
- Winterminima	Bis +10 Kelvin	<i>Luftverunreinigungen</i>	
- in Einzelfällen	Bis +15 Kelvin	- Kohlenstoffmonoxid (CO)	Mehr
Dauer der Frostperiode	Bis -30 Prozent	- Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	Mehr
<i>Bioklima</i>		- Feinstaub (PM <sub>x</sub> )	Mehr
Vegetationsperiode	Bis zu 10 Tage länger	- anthropogene Kohlenwasserstoffe	Mehr
Humane Wärmebelastung	Mehr	- Ozon	Weniger
Humaner Kältereiz	Weniger		(Spitzenwerte höher)

***Strahlungs- und Wärmehaushalt***

Die anthropogen eingebrachten Spurenstoffe führen nach KUTTLER (2004a) zu einer Dunstglocke und somit zu einer Abschwächung der Globalstrahlung ( $K\downarrow$ ), die mit Jahreszeit und Sonnenstandshöhe variiert. Der Anteil diffuser Strahlung ist höher als der Anteil der direkten Strahlung. Die kurzwellige Reflexion ( $K\uparrow$ ) ist abhängig von Farbe, Struktur und Geometrie der städtischen Oberflächen und vergleichbar mit der des nicht bewaldeten Umlands. In mediterranen Städten ist die Reflexion aufgrund der hellen Hausfassaden und der damit höheren Albedo stärker als in Mitteleuropa, was sich besonders auf die Strahlungsbilanz auswirkt ( $Q\downarrow$ ). Die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung ( $L\downarrow$ ) ist in der Stadt erhöht. Die UV-Strahlung ist aufgrund der verschmutzten Stadtatmosphäre reduziert, vor allem im Winter. Das städtische Relief der Bebauung verkürzt die Sonnenscheindauer in den Straßenschluchten aufgrund stärkerer Verschattung. Vor allem die Ströme fühlbarer ( $Q_H$ ) und latenter Wärme ( $Q_E$ ) sind deutlich verändert und variieren je nach Flächennutzung, Witterung sowie Tages- und Jahreszeit. Die tagsüber durch die Baumaterialien des Stadtkörpers aufgenommene Wärme ( $Q_B$ ) ist in ihrer Summe bedeutsam und ein gewichtiger Bestandteil der urbanen Energiebilanz (KUTTLER 2004a). Die Energiebilanz setzt sich aus Strahlungs- und Wärmehaushalt zusammen und stellt sich wie folgt dar (KUTTLER 2004b):

$$Q^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow - L \uparrow_{refl}. \quad (1)$$

$$Q^* + Q_{anthr} + Q_{Met} + Q_H + Q_E + Q_B = 0 \quad (2)$$

mit

$Q^*$	=	Strahlungsbilanz
$K \downarrow$	=	Summe aus direkter und diffuser Globalstrahlung
$K \uparrow$	=	kurzwellige Reflexion
$L \downarrow$	=	langwellige atmosphärische Gegenstrahlung
$L \uparrow$	=	langwellige Ausstrahlung
$L \uparrow_{refl}$	=	langwellige Reflexion
$Q_{anthr}$	=	anthropogene Wärmeflussdichte
$Q_{Met}$	=	metabolische Wärmeflussdichte
$Q_H$	=	turbulente fühlbare Wärmeflussdichte
$Q_E$	=	turbulente latente Wärmeflussdichte
$Q_B$	=	Bodenwärmeflussdichte

### Thermische Verhältnisse

Aufgrund der Wärmespeicherung in den Baumaterialien des Stadtkörpers sind die Temperaturen im Jahresmittel um 1 bis 2 Kelvin höher als im Umland der Stadt (KUTTLER 2004a); es kommt zur Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel (*urban heat island, UHI*). Abbildung 2 stellt die Stärke der Temperaturabweichung zwischen Stadt und Umland in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit für Bochum dar. Allgemein ist die Wärmeinsel vor allem in Sommernächten stark ausgebildet, während sie tagsüber nicht oder nur schwach wahrnehmbar ist (PARLOW 2003, KUTTLER 2012).

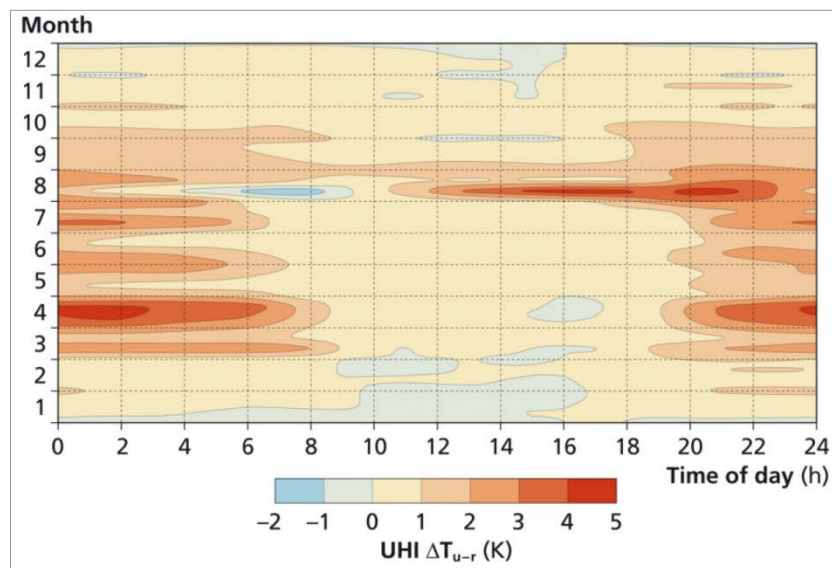
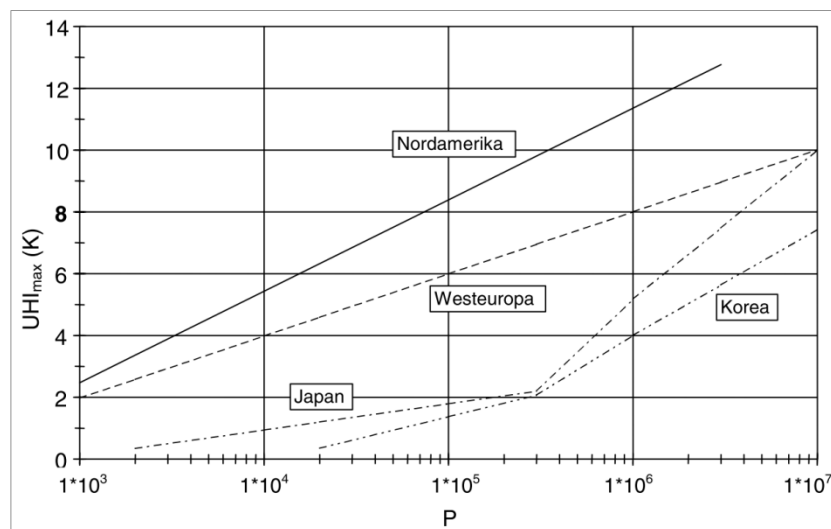


Abbildung 2: Zeitabhängige Temperaturabweichung zwischen Stadt und Umland. Stündliche Mittelwerte der Abweichung in Kelvin in Bochum in der Zeit von Oktober 2006 bis Oktober 2007 (KUTTLER 2012:108)

Die Intensität der städtischen Wärmeinsel, d. h. die Stärke der Temperaturabweichung zwischen Stadt und Umland, variiert mit der Stadtgröße und -struktur, der Tages- und Jahreszeit sowie der Wetterlage. Es können Abweichungen von mehr als 10 Kelvin auftreten (KUTTLER 2004a). OKE (1973) arbeitete die Bedeutung der Einwohnerzahl bzw. der Stadtgröße für die Ausprägung der Wärmeinsel heraus: je größer die Einwohnerzahl bzw. Ausdehnung der Stadt, desto größer ist der Temperaturunterschied zum städtischen Umland. Abbildung 3 zeigt diesen Zusammenhang zwischen der Wärmeinselintensität und der Einwohnerzahl für verschiedene Kulturräume. Es ist ersichtlich, dass sich je nach Kulturräum durch unterschiedliche Bauweisen und Stadtstrukturen große Unterschiede für die Wärmeinselintensität ergeben können (MATZARAKIS 2001). In der Regel ist die städtische Wärmeinsel nicht räumlich homogen ausgebildet, sondern gleicht aufgrund der heterogenen Stadtstruktur eher einem Archipel von einzelnen Wärmeinseln (HUPFER & KUTTLER 2006). Neben der oberirdischen Wärmeinsel existiert eine unterirdische Wärmeinsel. MENBERG et al. (2013) zeigten für verschiedene deutsche Großstädte, dass diese mit der oberirdischen Wärmeinsel in Lage und Intensität korreliert und fanden um 3 bis 7 Kelvin höhere Temperaturen des oberflächennahen Grundwassers im Vergleich zum Umland. Auch LOKOSHCHENKO & KORNEVA (2015) konnten für Moskau eine um 0,6 bis 0,8 Kelvin höhere mittlere Bodentemperaturen im Stadtzentrum nachweisen.



**Abbildung 3:** Ausprägung der maximalen städtischen Wärmeinselintensität für verschiedene Kulturräume. Abhängigkeit des Temperaturunterschieds in Kelvin ( $UHI_{max}$ ) vom Logarithmus der Einwohnerzahl (P) für Städte in Nordamerika, Westeuropa, Japan und Korea (KUTTLER 2004b:265)

### **Bioklima**

Der Effekt der städtischen Wärmeinsel kann, besonders während sommerlicher Hitzeperioden, zu einer höheren thermischen Belastung der Stadtbevölkerung führen. Zahlreiche Studien belegen den Zusammenhang zwischen hoher Wärmebelastung und einer erhöhten Morbidität



bzw. Mortalität (z. B. KOVATS & HAJAT 2008, MICHELOZZI et al. 2009, SCHERER et al. 2013; vgl. Kapitel 2.4.1). Die städtische Luft ist durch Verunreinigungen geprägt, die im Ergebnis zu einer gesundheitlichen Belastung des Menschen führen können. Besonders relevant sind dabei in Deutschland Stickstoffoxide ( $NO_x$ ), Ozon ( $O_3$ ), Feinstaub ( $PM_{10}$ ) und organische Verbindungen ( $NM VOC$ ,  $PAK$ , Benzol). Das städtische Klima hat einige wenige Vorteile für den Menschen. So hat die Stadtbevölkerung einen geringeren Heizenergiebedarf und muss im Winter seltener Schnee beseitigen (STEINRÜCKE et al. 2010).

### ***Hygrische Verhältnisse***

Die relative Luftfeuchtigkeit ist in Städten infolge der eingeschränkten Evapotranspiration insbesondere am Tag reduziert, wohingegen in der Nacht gleich hohe oder höhere Werte im Vergleich zum Umland feststellbar sind. Nebel tritt in Großstädten seltener auf, was in der höheren Lufttemperatur und der geringeren Luftfeuchtigkeit begründet ist (KUTTLER 2004a). Für die Unterschiede der Niederschlagsverhältnisse zwischen Stadt und Umland gibt es laut MILLS (2014) auch nach Jahrzehnten Forschungsarbeit noch keine ausreichenden Erkenntnisse. Aktuelle Untersuchungen gehen jedoch davon aus, dass urbane Räume die Entstehung und Verteilung von Niederschlag beeinflussen. Dies gilt vor allem für die im Sommerhalbjahr verstärkt auftretenden Konvektionsereignisse oder für Niederschlagsmengen, die im Lee von Städten meist erhöht sind (KUTTLER 2004b). Hierbei sind als niederschlagsmodifizierende Faktoren zu nennen: Beeinflussung der Wolkendynamik durch den Wärmeinseleffekt und erhöhte Oberflächenrauigkeit, Wechselwirkung von Partikelemission und wolkenphysikalischen Prozessen sowie rauigkeitsbedingte bodennahe Tropfenablenkung (SCHÜTZ 1995). Feste Niederschläge in Form von Schnee sind in Städten aufgrund des Wärmeinseleffektes etwas reduziert (KUTTLER 2004b).

### ***Luftaustausch und Lufthygiene***

In bebauten Gebieten wird das Windfeld im Vergleich zum Umland stark verändert. Einerseits liegt dies an der städtischen Bebauung, die die Bodenrauigkeit erhöht, andererseits wird das Luftdruckfeld durch die städtische Wärmeinsel beeinflusst. Im Ergebnis sind in Städten folgende Charakteristika des Windfeldes zu beobachten (KUTTLER 2004b): geringere Windgeschwindigkeiten, häufigere Windstille, mehr Schwachwindstunden, verstärkte mechanische und thermische Turbulenz und Böigkeit sowie eine starke Beeinflussung der Windrichtungen. Bei windschwachen, autochthonen Wetterlagen und dem Vorhandensein von Luftleitbahnen

kann kühlere Luft, durch Lokalwindssysteme wie Hang- oder Flurwinde, aus dem Umland in die Stadt eindringen und den Luftaustausch begünstigen (KUTTLER 2004b).

### ***Luftschichtung über Städten***

Stadtklimatische Effekte im Vergleich zum Umland sind das ganze Jahr über zu beobachten, jedoch am intensivsten während autochthoner – d. h. austauscharmer, strahlungsreicher – Wetterlagen ausgebildet, die vor allem bei antizyklonalen Großwetterlagen entstehen und sich durch deutliche Tagesgänge der meisten Klimaelemente auszeichnen (KUTTLER 2004a). Das Stadtklima hat jedoch keine einheitliche Ausprägung, sondern ist das Ergebnis des Zusammenwirkens einer Vielzahl von Mikroklimaten. Die vertikale Gliederung der Stadtatmosphäre stellt sich wie folgt dar (ARNFIELD 2003, KUTTLER 2004b, OKE 2006a, MILLS et al. 2010): Die Luft der planetaren Grenzschicht (*planetary boundary layer, PBL*) wird auf der Mesoskala durch die städtischen Oberflächeneigenschaften beeinflusst und es bildet sich eine städtische Grenzschicht (*urban boundary layer, UBL*) heraus, eine Art urbane Abluftfahne (Abbildung 4a, S. 13). Die unterste Schicht der städtischen Grenzschicht bildet die Stadthindernisschicht (*urban canopy layer, UCL*), die bis etwa zum Dachniveau reicht, in diesem Bereich finden die menschlichen Aktivitäten statt. Hier beeinflusst der Mensch durch planerische Entscheidungen wie z. B. Gebäudeform oder Begrünung die Ausbildung von unzähligen Mikroklimaten (Abbildung 4c, S. 13). Deren mikroklimatische Beiträge mischen sich innerhalb der Stadtreibungsschicht (*urban roughness sublayer, URS*) bis dann ab etwa zweifacher Haushöhe eine fast vollständige Durchmischung vorliegt und sich ein homogenes Turbulenzfeld (*inertial sublayer*) ausbildet (Abbildung 4b, S. 13). Daran schließt sich nach oben die städtische Mischungsschicht (*urban mixing layer, UML*) an, die bis zu zwei Kilometer mächtig ist (Abbildung 4a, S. 13). Darüber hinaus ist ein stadtklimatischer Einfluss auf die Luftschichtung nicht mehr nachweisbar.

Eine horizontale Gliederung oder eine Unterteilung der Stadt in Mikroklimata kann u. a. über sogenannte Klimatope erfolgen, die vor allem in Deutschland gebräuchlich sind. „*Klimatope bezeichnen räumliche Einheiten, in denen die mikroklimatisch wichtigsten Faktoren relativ homogen und die Auswirkungen wenig unterschiedlich sind*“ (VDI-KRL 2008: 44). Eine andere Klassifikation stellen STEWART & OKE (2012) mit den *local climate zones (LCZ)* vor, die weltweit anwendbar sind und eine Standardisierung von Wärmeinselstudien ermöglichen soll.

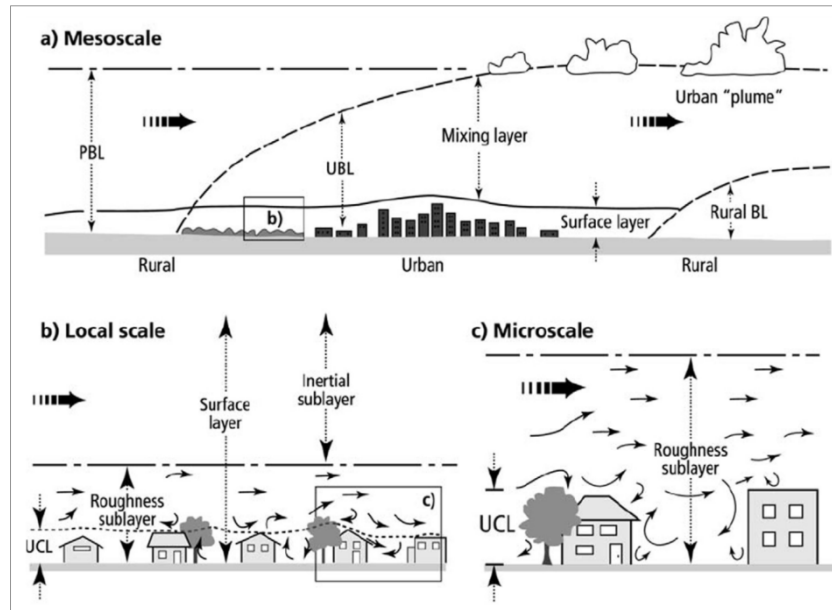


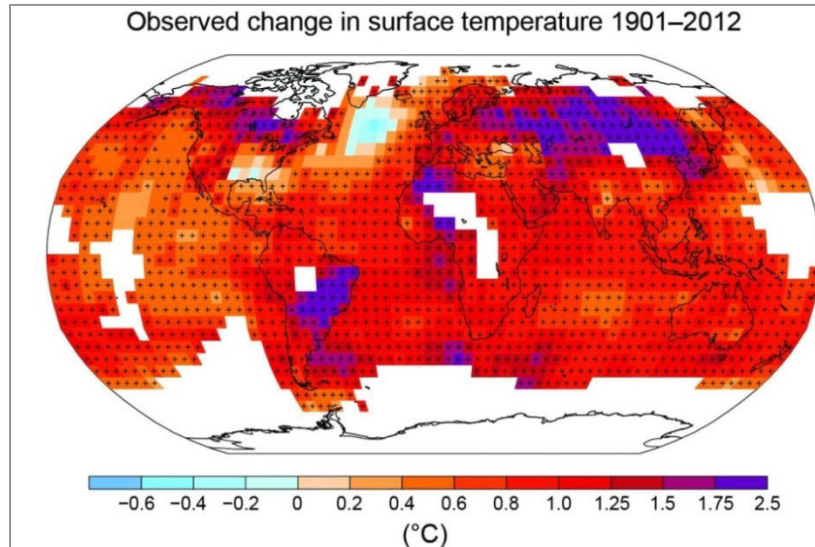
Abbildung 4: Luftschichtung über Städten. Die Skalen des Stadtklimaeffektes: a) Mesoskala, b) Lokalskala, c) Mikroskala (OKE 2006a:3)

## 2.2 Anthropogener Klimawandel

### 2.2.1 Globale klimatische Veränderungen

Die Veränderung des Klimas auf der Erde ist ein seit Jahrmillionen stattfindender natürlicher Prozess. Zahlreiche Beobachtungen zeigen jedoch, dass sich das globale Klima seit Mitte des 20. Jahrhunderts signifikant verändert. Diese Veränderungen werden dem Einfluss des Menschen zugeschrieben. Laut Weltklimarat (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) sind globale Folgen des anthropogenen Klimawandels u. a. (IPCC 2014a):

- Anstieg der globalen Lufttemperatur um 0,85 °C zwischen 1880 und 2012 (Abbildung 5, S. 14), Klimaperiode 1983-2012 als wärmste seit 1.400 Jahren in Nordhemisphäre;
- Abtauen von Gletschern, Eisschilden und polaren Eiskappen;
- Globale Ozeanerwärmung durch Absorption von 90 % der Wärmeenergie, die der Atmosphäre 1971-2010 durch den Klimawandel zusätzlich zugeführt wurde;
- Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels um ca. 19 cm zwischen 1901 und 2010 aufgrund des Abtauens von Gletschern sowie der Wärmeausdehnung des Meerwassers;
- Niederschlagszunahme in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre und feuchten Tropen zwischen 1950 und 2008, Abnahme in trockenen Subtropen;
- Veränderung von Wetterextremen wie Abnahme kalter Tage und Nächte, Zunahme warmer Tage und Nächte, Zunahme von Hitzewellen in Europa, Asien und Australien sowie Zunahme von Starkregenereignissen in Europa und Nordamerika.

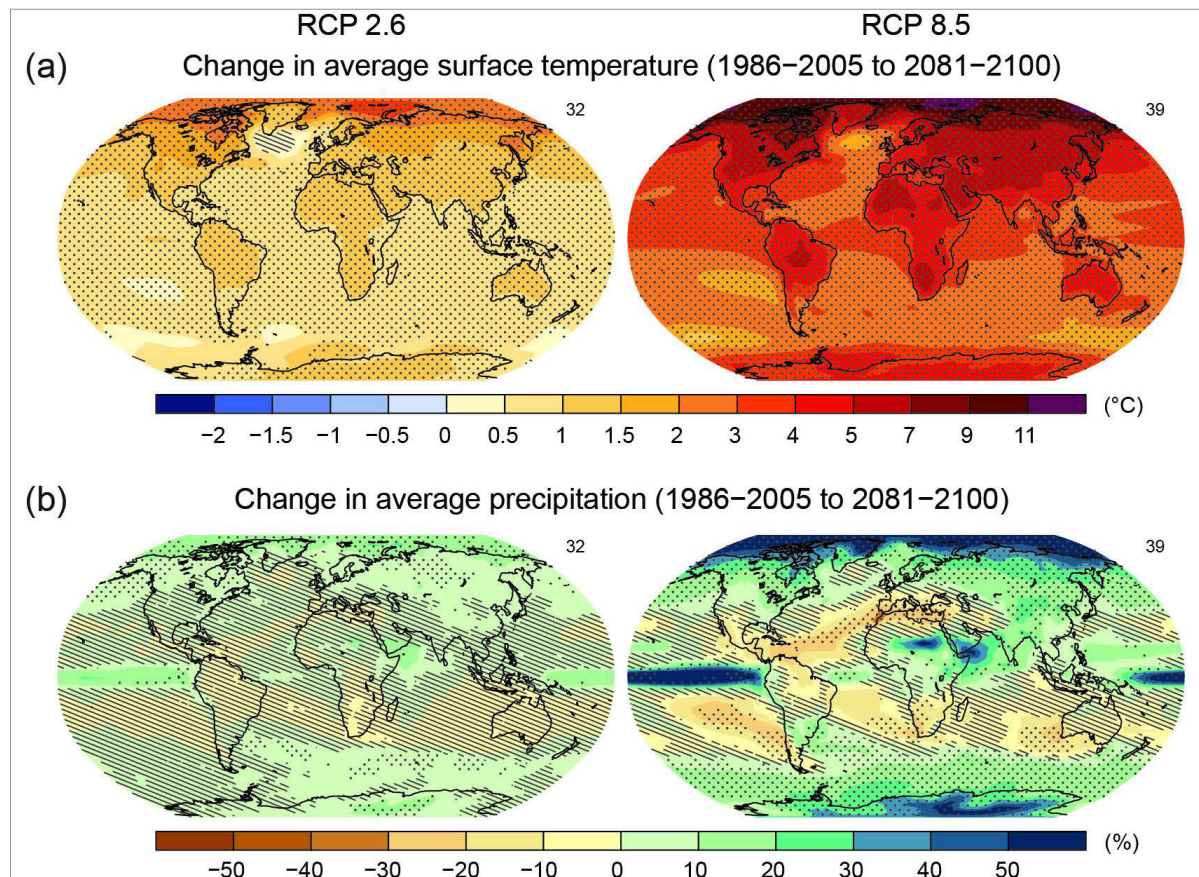


**Abbildung 5: Beobachtete Oberflächentemperaturveränderung zwischen 1901 und 2012. Weiße Zellen zeigen unzureichende Daten, Pluszeichen einen signifikanten Trend (IPCC 2014a:6)**

Heute besteht ein breiter wissenschaftlicher Konsens darüber, dass der Mensch und seine industrielle Entwicklung durch Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre, wie z. B. Kohlendioxid ( $CO_2$ , 76 % Emissionsanteil), Methan ( $CH_4$ , 16 %) und Lachgas ( $N_2O$ , 6 %), die beobachtete Erwärmung herbeigeführt hat: „*It is extremely likely that human influence has been the dominant cause of the observed warming since the mid-20th century*” (IPCC 2014a: 17). Die atmosphärische Konzentration der drei genannten Treibhausgase stieg seit 1750 um 40 %, 150 % bzw. 20 % und führte zur höchsten Konzentration dieser Gase seit 800 Tsd. Jahren. Die Hauptquellen dieser Emissionen sind weltweit für 2010 der Energiesektor mit 35 %, die Land- und Forstwirtschaft sowie weitere Landnutzungen mit 24 %, die Industrie mit 21 %, das Transportwesen mit 14 % und der Gebäudesektor mit 6 % (IPCC 2014a, 2014c).

Geht der Ausstoß an Treibhausgasen im bisherigen Ausmaß weiter, würden sich bisher beobachtete Veränderungen im Klimasystem fortsetzen und verstärken. Zur Fortschreibung der möglichen sozio-ökonomischen Entwicklung wurden durch den IPCC vier neue Szenarien verwendet (*Representative Concentration Pathways, RCP*): *RCP2.6*, *RCP4.5*, *RCP6.0* und *RCP8.5*. Je nach weiterem Treibhausgasausstoß und Klimaschutzmaßnahmen würde sich bis 2100 ein mittlerer Temperaturanstieg zwischen 0,9 und 5,4 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter einstellen. Die Einhaltung des 2 °C-Ziels wird nur im ambitioniertesten Szenario *RCP2.6* erreicht (IPCC 2014a). Die Veränderung der Oberflächentemperatur und des Jahresniederschlags wird je nach Szenario und Region sehr unterschiedlich ausfallen, wie Abbildung 6 (S. 15) verdeutlicht. Weitere projizierte Veränderungen des Klimasystems umfassen: mehr Hitzeextreme, längere Trockenperioden, intensivere und häufigere Starkniederschläge,

eine fortgesetzte Ozeanerwärmung und -versauerung, zunehmender Gletscher- und Meereis-schwund sowie ein weiterer Meeresspiegelanstieg (IPCC 2014a).



**Abbildung 6: Projizierte Veränderung der Erdoberflächentemperatur und des Niederschlags. Vergleich der Klimaperioden 1986-2005 und 2081-2100 für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 für die jährliche mittleren Erdoberflächentemperatur (a) und den jährlichen mittleren Niederschlag (b) (IPCC 2014a:22)**

## 2.2.2 Auswirkungen auf urbane Räume

Urbane Räume spielen aufgrund der Konzentration von Menschen, Infrastrukturen und Wirtschaftsaktivitäten eine besondere Rolle in Bezug auf den Klimawandel: „*Urban areas hold more than half the world's population and most of its built assets and economic activities. They also house a high proportion of the population and economic activities most at risk from climate change, and a high proportion of global greenhouse gas emissions are generated by urban-based activities and residents*” (IPCC 2014b: 538). Der Anteil der urbanen Bevölkerung liegt heute weltweit bei etwa der Hälfte und wird für 2050 auf zwei Drittel geschätzt (DESA 2014). Damit wird künftig die Anzahl der Menschen steigen, die sowohl dem Stadtklima und seinen gesundheitlichen Belastungen als auch Risiken durch den Klimawandel ausgesetzt sind. In urbanen Räumen werden der größte Anteil des Bruttoinlandproduktes erwirtschaftet sowie die meisten Investitionen getätigt, so dass hier auch die größten wirtschaft-

lichen Schäden durch Klimawirkungen zu erwarten sind (WB 2008, SATTERTHWAITE et al. 2010). Die Wirkung des globalen Klimawandels auf eine Stadt ist demnach nicht nur von klimatischen Veränderungen abhängig, sondern wird auch durch ihre soziale, ökonomische, ökologische und infrastrukturelle Ausstattung mitbestimmt (BIRKMANN 2006, BMVBS 2011).

Die für Städte besonders relevanten klimabezogenen Risiken werden mit dem Klimawandel zunehmen. Es kommt zu einer höheren Frequenz, Intensität und Dauer von Wetterextremen wie z. B. Starkniederschlägen, Hitzewellen, Trockenperioden, Überschwemmungen oder Sturmfluten. Gleichzeitig beeinflussen Städte durch ihre Baudichte und Ausdehnung ihr eigenes Mikroklima (vgl. Kapitel 2.1.2), was durch die Wechselwirkung mit den Klimaveränderungen teilweise noch verstärkt wird (IPCC 2014b). Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur und der Anzahl heißer Tage führt zu einer Zunahme der Wärmebelastung und der damit verbundenen Gesundheitsprobleme (vgl. Kapitel 2.4.2). Trockenperioden können zu Engpässen in der Wasser- und Energieversorgung führen, Krankheiten durch Benutzung verunreinigten Wassers fördern und Lebensmittelpreise infolge von Ernteaussfällen erhöhen (IPCC 2014b). Sturmfluten, Überschwemmungen und ein steigender Meeresspiegel stellen ebenfalls kritische Klimawirkungen dar, da viele Städte in niedrigliegenden Küstenregionen zu finden sind (MCGRANAHAN et al. 2007). Das gilt umso mehr, wenn sich in diesen Städten große Häfen, Petrochemie- oder Energieindustrien befinden (HALLEGATTE et al. 2013). Häufigere und intensivere Starkniederschläge können weitreichende Folgen für die Entwässerungssysteme haben und führen zu Sturzfluten und innerstädtischen Überschwemmungen (WILLEMS 2012). Des Weiteren gibt es Hinweise darauf, dass durch den Klimawandel austauscharme Wetterlagen häufiger werden (GROSS 1996, JACOB & WINNER 2009). Dies führt u. a. zu einer vermehrten Bildung von Ozon und höheren Ozonkonzentrationen in der Stadtluft und den entsprechenden Gesundheitsrisiken für die Bevölkerung (JACOB & WINNER 2009, KUTTLER 2011).

Im Ergebnis hat der Klimawandel tiefgreifende Auswirkungen auf ein breites Spektrum von Infrastrukturen, Dienstleistungen, Ökosystemdienstleistungen und den Stadtkörper selbst, wie die Übersicht in Tabelle 2 (S. 17) eindrücklich zeigt. Infolge dieser großen Verwundbarkeit urbaner Räume gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels sind Anpassungsaktivitäten hier besonders notwendig (IPCC 2014b). Entsprechend hoch ist die Aufmerksamkeit internationaler Organisationen und Netzwerke für dieses Thema (WB 2010, OECD 2010, 2014, UN-HABITAT 2011, ROSENZWEIG et al. 2011, 2015).



**Tabelle 2: Klimawirkungen in urbanen Handlungsfeldern (eigene Darstellung nach IPCC 2014b:556ff.)**

<b>Handlungsfeld</b>	<b>Mögliche negative Klimawirkungen</b>
Wasser- versorgung, Abwasser- und Abfall- entsorgung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderungen des Wasserbedarfs der Bevölkerung sowie der Versorgung und des Managements desselben (O'HARA &amp; GEORGAKAKOS 2008)</li> <li>• Verringerung des verfügbaren Grundwassers und dessen Qualität (PRASKIEVICZ &amp; CHANG 2009, TAYLOR &amp; STEFAN 2009) sowie Infrastrukturschäden durch Absenkungen infolge starker Grundwasserentnahme (BABEL et al. 2006, ROMERO LANKAO 2010)</li> <li>• Zunehmende Spannungen zwischen Wassernutzern (Wohnbevölkerung, Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft) in Trockenperioden (ROY et al. 2012, TIDWELL et al. 2012)</li> <li>• Überlastung der Abwassersysteme durch Starkniederschläge (WONG &amp; BROWN 2009, HOWARD et al. 2010, MITLIN &amp; SATTERTHWAITE 2013)</li> </ul>
Energie- versorgung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderte Energiebedarfsmuster: höherer Bedarf für Kühlenergie während Hitzeperioden, verringerter Energiebedarf in der Heizperiode (RADHI 2009, MIDEKSA &amp; KALLBEKKEN 2010, ROSENZWEIG et al. 2011)</li> <li>• Einschränkung der Wasserkraftnutzung während Trockenperioden bzw. Niedrigwasser (MULLER 2007, LUCENA et al. 2009, GOBER 2010, SCHAEFFER et al. 2012)</li> <li>• Stromausfälle durch Energiebedarfsspitzen zur Kühlung während Hitzewellen (MIRASGEDIS et al. 2007, MIDEKSA &amp; KALLBEKKEN 2010, MALLER &amp; STRENGERS 2011)</li> <li>• Einschränkungen des täglichen Lebens (ÖPNV, Verkehrsleitsysteme, Arbeitsausfälle, Produktion, Versorgung etc.) durch Stromausfälle (JOLLANDS et al. 2007, ZIMMERMAN &amp; FARIS 2010, ROSENZWEIG et al. 2011)</li> <li>• Schäden an Infrastrukturen zur Energieerzeugung und -verteilung durch Sturmereignisse (ROSENZWEIG et al. 2011)</li> </ul>
Transport und Telekommuni- kation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterbrechung von Transportwegen (Straßen, Bahntrassen, Flugplätzen, Häfen) durch Starkniederschläge, Hochwasser, Sturm (KOETSE &amp; RIETVELD 2009, LOVE et al. 2010, GASPER et al. 2011, HALLEGATTE et al. 2013)</li> <li>• Schäden an Straßen und Bahntrassen durch Hitze, Vereisung und Sturm (DOBNEY et al. 2009, KOETSE &amp; RIETVELD 2009, PALIN et al. 2013) sowie an Straßen, Gebäuden etc. durch auftauenden Permafrost in nördlichen Breiten (PROWSE et al. 2009)</li> <li>• Indirekte gesundheitliche und wirtschaftliche Schäden durch Unterbrechung von Notfall- und Transportwegen (REVI 2005, KOETSE &amp; RIETVELD 2009, RAHMAN et al. 2010)</li> <li>• Unterbrechung der Kommunikationswege durch Sturmereignisse (Zerstörung von Masten und Leitungen), Überschwemmung (z. B. von Verteilerstationen) und auftauendem Permafrost (Absenkung von Sendemasten in nördlichen Breiten (REVI 2005, LARSEN et al. 2008, ZIMMERMAN &amp; FARIS 2010)</li> <li>• Verzögerung und Behinderung von Katastropheneinsätzen durch Ausfall der Kommunikationswege (JACOB et al. 2011)</li> </ul>
Bauwesen und Denkmalschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stärkere Abnutzung und Verwitterung von Baumaterialien durch höhere Variabilität von Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchte (GROSSI et al. 2007, THORNBUSH &amp; VILES 2007, SMITH et al. 2008, BONAZZA et al. 2009, STEWART et al. 2011)</li> <li>• Wohnbebauung als Hauptteil der beschädigten städtischen Infrastruktur bei Extremereignissen, besonders bei provisorischen Bauten in sogenannten Entwicklungsländern (ALAM &amp; RABBANI 2007, JACOBS &amp; WILLIAMS 2011, ADELEKAN 2012)</li> <li>• Beschädigung von Baudenkmalern durch höhere Klimavariabilität und Extremereignisse wie Überschwemmung, Sturm etc. (DIAGNE 2007, GROSSI et al. 2007)</li> </ul>
Stadtgrün, Erholung und Ökosystem- dienstleistungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hitze- und Trockenstress für Stadtbäume durch geringere oder variablere Niederschläge (TUBBY &amp; WEBBER 2010, KITHA &amp; LYTH 2011)</li> <li>• Einwanderung invasiver Arten und Schadorganismen aufgrund wärmerer Temperaturen (WALTHER et al. 2009, BRADLEY et al. 2010, TUBBY &amp; WEBBER 2010)</li> <li>• Verlust von urbanen Küstenfeuchtgebieten infolge des Meeresspiegelanstiegs bei fehlenden Rückzugsmöglichkeiten (GAFFIN et al. 2012)</li> </ul>
Gesundheits- und Sozial- wesen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verletzungen und Todesfälle durch Hitze, Starkregen, Sturm, Hochwasser etc. (DASGUPTA et al. 2009, ÅSTRÖM et al. 2013, BENNETT et al. 2014, HONDA et al. 2014,)</li> <li>• Mehr Krankheitsfälle durch vektorbasierte Krankheiten, Wasser- und Luftverschmutzung (KEARNEY et al. 2009, TAGARIS et al. 2009, KOLSTAD &amp; JOHANSSON 2010, BÉGUIN et al. 2011, CHENG et al. 2011)</li> <li>• Stärkere Auslastung von Gesundheits-/Sozialeinrichtungen während Extremereignissen wie Hitzeperioden oder Hochwasser (HUANG et al. 2011, ROSENZWEIG et al. 2011)</li> </ul>

## **2.3 Raumplanung und Stadtklima**

### **2.3.1 Bedeutung der Raumplanung für die Klimaanpassung**

Die Raumplanung spielt eine Schlüsselrolle bei der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels und viele Studien belegen ihre Bedeutung als treibende Kraft des Anpassungsprozesses (WILSON 2006, STERN 2007, MEASHAM et al. 2011, ROSENZWEIG et al. 2011, HURLIMANN & MARCH 2012, OVERBECK & FRANCK 2012, CARTER et al. 2015). In diesem Kontext bezieht sich Raumplanung auf die übergeordnete, querschnittsorientierte und koordinierende räumliche Planung durch den öffentlichen Sektor, deren Hauptaufgabe in der Optimierung der künftigen Landnutzungsverteilung liegt (RANNOW et al. 2010). Die Bedeutung der Raumplanung für die Klimaanpassung beruht darauf, dass die räumliche Konfiguration von Siedlungsräumen, d. h. wie Flächen in ihnen genutzt und entwickelt werden, einen starken Einfluss auf die Auswirkungen des Klimawandels hat (HURLIMANN & MARCH 2012). Während der Klimaschutz nationaler und internationaler Strategien und Abkommen bedarf um effektiv zu sein, ist die Klimaanpassung stärker auf regionaler und lokaler Ebene verankert, da sich die Klimawirkungen letztlich vor Ort manifestieren.

Die Anpassungsplanung fügt sich sehr natürlich in das Aufgabenfeld der Stadt- und Regionalplanung ein (BLANCO et al. 2009). Die Bundesregierung betont die strategische Bedeutung der Raumplanung für die Klimaanpassung in der nationalen Anpassungsstrategie: *„Die Raum-, Regional- und Bauleitplanung stehen am Anfang der Risikovermeidungskette, da sie räumliche Vorsorgekonzepte entwickeln, die Planungsdokumente hohe Bestandsdauer und rechtliche Verbindlichkeit besitzen und bis zur praktischen Umsetzung der Planinhalte teilweise lange Vorlaufzeiten entstehen“* (RBD 2008: 42). Die Ministerkonferenz für Raumordnung definierte Handlungsbereiche für die Klimaanpassung auf Landes- und Regionalplanungsebene (MKRO 2009). Gleichzeitig müssen aktuelle Herausforderungen wie der demographische Wandel, der Stadtumbau oder die Energiewende in Planungsprozessen mit betrachtet und in Einklang mit den Anpassungsnotwendigkeiten gebracht werden (OVERBECK & FRANCK 2012). Ziel ist es, alle relevanten Raumansprüche in einer integrierten Stadtentwicklung zu vereinen und die daraus resultierenden Synergien zu nutzen sowie mögliche Konflikte zu minimieren.



Die Auswirkungen des Klimawandels können laut BMVBS (2011) durch die Raumplanung adressiert werden, wenn sie

- raumbedeutsam im Sinne § 1 Abs. 1 bzw. § 7 Abs. 3 des Raumordnungsgesetzes (ROG) sind und demnach eine überörtliche und überfachliche Betrachtung erfordern und/oder
- einen greifbaren Bezug zur Bodennutzung nach Art. 74 Abs. 1 Nr. 18 Grundgesetz in Verbindung mit § 1 Abs. 1 des Baugesetzbuches (BauGB) aufweisen, wodurch sie in der Bauleitplanung zu behandeln sind.

Aufgrund des klaren Raumbezuges vieler Klimawirkungen, z. B. Überschwemmungen durch Starkregen oder Wärmebelastung durch die städtische Wärmeinsel, sowie der Maßnahmen zur Klimaanpassung, z. B. Flächenentsiegelung zur Regenwasserversickerung oder Verschattung durch Baumpflanzungen, bieten sich Ansatzpunkte zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen. Damit kann konstatiert werden: *„Der Klimawandel ist raumplanungsrelevant, wenn mit Hilfe raumplanerischer Instrumente Eintrittswahrscheinlichkeit, Intensität oder Konsequenz von Klimafolgen für bestimmte, ausreichend sicher identifizierbare Entstehungs- und/oder Betroffenheitsräume beeinflussbar sind oder planerische Anpassungsstrategien gestaltet werden können“* (BMVBS 2011: 49).

Die Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsstrategien findet auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen statt. Während auf Landes- und Regionsebene Kreis- und Gemeindegrenzen überschreitende großflächige naturräumliche Zusammenhänge erfasst und abgestimmt werden, z. B. vorbeugender Hochwasserschutz und regionale Grünzüge, müssen siedlungsrelevante Klimawirkungen, wie Wärmebelastung für die Bevölkerung oder Überschwemmungen durch Starkregen, auf kommunaler Ebene angegangen werden (SCHLIPF et al. 2008). Auf der Ebene der Stadtplanung, stellt das Baugesetzbuch (BauGB) verschiedene Instrumente zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen bereit (KEMPER et al. 2011):

- Bauleitplanung (Flächennutzungsplan § 5 BauGB, Bebauungsplan §§ 8, 9 BauGB),
- Städtebauliche Verträge (§ 11 BauGB),
- Stadterneuerung / städtebauliche Sanierung (§§ 136 ff BauGB),
- Stadtumbau (§§ 171a ff BauGB),
- Private Investitionen der Stadtentwicklung (§ 171 f BauGB) und
- Städtebauliche Pflanz-, Rückbau- und Entsiegelungsgebote (§ 178 BauGB).

Des Weiteren sind die Instrumente der Baunutzungsverordnung (BauNVO) und der Landesbauordnungen, wie der ThürBO in Thüringen, zu nennen. Nach BAUMÜLLER (2015) und BAUMÜLLER UND BAUMÜLLER (2011) eignen sich vor allem der städtebauliche Rahmenplan, der Flächennutzungsplan und der Bebauungsplan für die Implementierung von Anpassungsmaßnahmen.

Mit der Novelle des BauGB vom 22.07.2011 wurde die sachliche Einheit von Klimaschutz und Klimaanpassung in der Stadtplanung festgeschrieben. So sollen Bauleitpläne *„dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern“* (BauGB § 1 Abs. 5 S. 2). Weiterhin wird ausgeführt: *„Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, Rechnung getragen werden“* (BauGB § 1 Abs. 5 S. 1). Demnach sind Klimaschutz und Klimaanpassung als weitere Belange nach BauGB § 1 Abs. 7 in die Abwägung einzustellen und Kommunen aufgefordert, Klimaschutz- und Klimaanpassungskonzepte als informelle Planung nach BauGB § 1 Abs. 6 Nr. 11 zu entwickeln (KURMUTZ et al. 2012).

Zur Umsetzung von Anpassungsstrategien mittels Planungsinstrumenten benötigen die Raumplaner detaillierte Informationen über die räumlichen Auswirkungen des Klimawandels. Da die betrachteten Klimawirkungen einen Raumbezug haben, empfiehlt sich die Verwendung von Karten als Informationsträger. Karten sind sowohl Arbeitsmittel für Planer als auch zur Informationsvermittlung an Politik und Öffentlichkeit geeignet. Es wird deutlich, dass kartografische Darstellungen geeignet sind, um klimatische Belange in der Stadtplanung zu kommunizieren (VDI-KRL 2003, REUTER & KAPP 2012, BAUMÜLLER 2015).

### **2.3.2 Klimakarten für die Stadtplanung**

#### ***Entwicklung in neuerer Zeit***

Bereits in den 1930er Jahren wurde in Stuttgart eine Abteilung Umweltschutz eingerichtet, da die warme Tallage mit schlechter Durchlüftung und Industrieansiedlungen regelmäßig zu starker Luftverschmutzung führte (HEBBERT 2014). In Stuttgart wurden in den 1970er Jahren die ersten Stadtklimakarten zur Bekämpfung von Luftverschmutzung eingesetzt und klimatologisches Wissen in der Landnutzungs- und Umweltplanung angewendet, nachdem bereits KNOCH (1963) ein Klimakartensystem zu Planungszwecken vorgeschlagen hatte. In den

1980er Jahren nutzte der Kommunalverband Ruhrgebiet Klimaanalysekarten in mehr als 25 Städten, um Flächen nach ihren Klimafunktionen und -charakteristika einzuordnen (z. B. STOCK & BECKRÖGE 1985, STOCK et al. 1986). Ende der 1980er Jahre wurde mit *Stadtklima Bayern* (MAYER 1988) ein Forschungsprojekt durchgeführt, das einen starken Fokus auf die Erstellung und Anwendung von Stadtklimakarten legte (REN 2015). 1992 veröffentlichte der Nachbarschaftsverband Stuttgart einen ersten *Klimaatlas* mit Karten zum thermischen Verhalten, Emissionen, Klimaanalyse und Planungshinweisen als Kommunikationsmittel zwischen Klimatologen und Planern (NVS 1992). 1993 wurde die verwendete Methodik vom Verein Deutscher Ingenieure in die Richtlinie 3787-1 (VDI-KRL 2003) übernommen, was zu einer breiten Anwendung in Deutschland führte (HEBBERT 2014). Die Richtlinie vereinheitlichte Methoden, Begriffe und Darstellungen klimatischer Phänomene für Klima- und Lufthygienekarten auf Stadt- und Regionsebene. Die in den 1970er und 1980er Jahren in der Bundesrepublik entwickelten Analysemethoden und Darstellungsformen dienten in anderen Ländern als Referenz, so z. B. in der Schweiz (SCHERER et al. 1997), Österreich (LAZAR et al. 1994), Schweden (LINDQVIST et al. 1983), Norwegen (STERTEN 1982) und Polen (PASZYNSKI 1991). Heute nutzen etwa 15 Länder das Kartensystem, vor allem in Europa, Ostasien und Südamerika (REN 2015).

Trotz der Etablierung von Klimakarten in der Raumplanung gibt es Schwierigkeiten bei der Implementierung von klimatischen Belangen im Planungsprozess. Nach ELIASSON (2000) sind diese u. a. auf fehlendes klimatologisches Wissen der Planer, das Fehlen von leicht zugänglichen und leicht verständlichen Informationen und Werkzeugen sowie den erhöhten Zeit- und Kostenaufwand für die Einarbeitung zurückzuführen. Gleichzeitig besteht ein Interesse der Planer an klimatologischen Zusammenhängen und ein Bewusstsein für die Bedeutung entsprechender Informationen (ELIASSON 2000, MEASHAM et al. 2011). Es besteht folglich ein Bedarf an gut aufbereiteten und leicht zugänglichen klimatologischen Informationen im Planungsalltag, verbesserter Kommunikation zwischen Planern und Klimatologen als auch thematischer Weiterbildung für die Planer (ELIASSON 2000, NG 2015, REN 2015).

### ***Struktur der Stadtklimakarten***

Das Kartensystem besteht aus zwei aufeinander aufbauenden Karten, einer *Klimaanalysekarte* (*Urban climatic analysis map, UC-AnMap*) und einer *Planungshinweiskarte* (*Urban climatic recommendation map, UC-ReMAP*) (VDI-KRL 2003, REN 2015). Die *Klimaanalysekarte* bildet die Synthese aus zahlreichen Basisdaten, wie Lufttemperatur, Windfeld, Flächennutzung,

Relief, Kaltluftströme und Emissionen, und dient der Darstellung der lokalklimatischen Gegebenheiten. Abbildung 7 zeigt die Eingangsdaten für die *Klimaanalysekarte*. In der Karte werden drei Themenkomplexe betrachtet: die städtische Wärmeinsel (u. a. Klimatope, Bioklima), der Luftaustausch (u. a. Kaltluftleitbahnen, Inversionen) und die Lufthygiene (u. a. Emissionen, Luftbelastung) (VDI-KRL 2003, REUTER & KAPP 2012, REN 2015). Ein zentrales Element bilden die *Klimatope*, Gebiete mit ähnlichen mikroklimatischen Ausprägungen, die sich insbesondere nach der Art der realen Flächennutzung unterscheiden (REUTER & KAPP 2012, vgl. Kapitel 2.1.2).

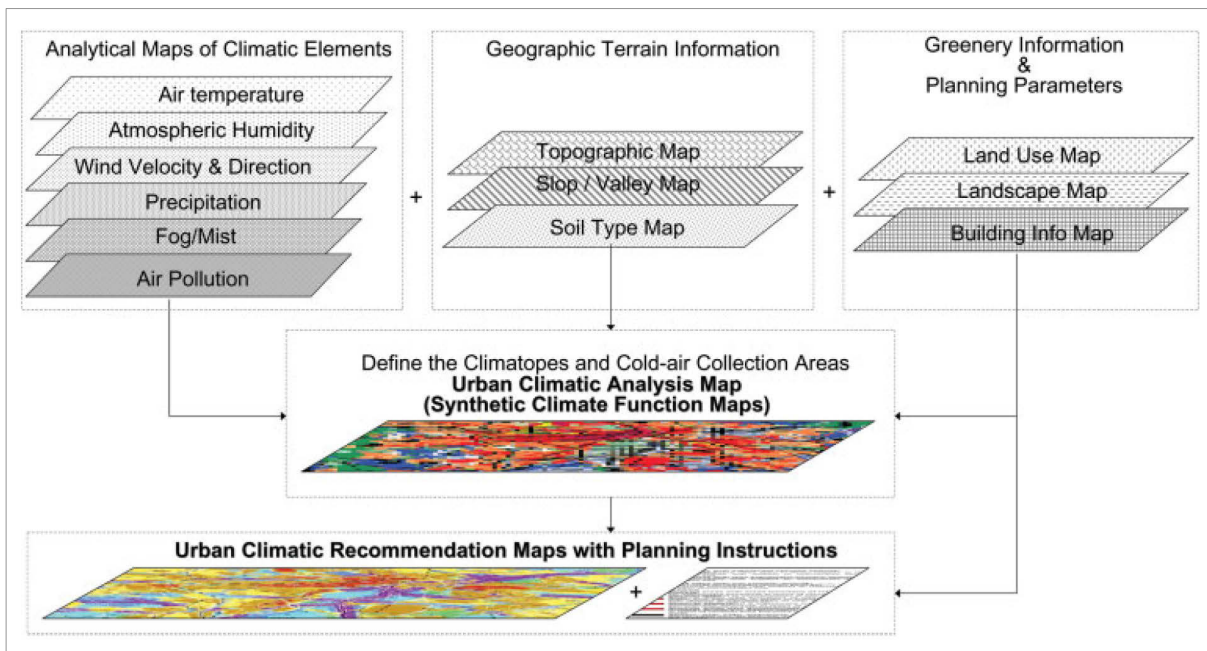


Abbildung 7: Eingangsdaten für Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten (REN 2015:14)

Die *Planungshinweiskarte* stellt eine integrierte, planungsorientierte Begutachtungsgrundlage dar, die auf Stadt- oder Stadtteilebene angewendet wird. Sie ist aus der *Klimaanalysekarte* abgeleitet und gibt Hinweise auf klimatisch-lufthygienische Auswirkungen von Landnutzungsänderungen (VDI-KRL 2003, REN 2015). Die *Planungshinweiskarte* wird durch Handlungsempfehlungen aus stadtklimatologischer Sicht unterlegt und stellt neben der Bewertung der aktuellen klimatischen Situation auch Problembereiche dar, die einer planerischen Entwicklung benötigen (REN 2015).

Die Erstellung der *Klimaanalyse-* und *Planungshinweiskarte* basiert auf Expertenwissen und einer qualitativen Beurteilung der lokalklimatischen Situation und kann auch subjektiv gefärbt sein (REN 2015). Eine Schlüsselinnovation für die weitere Entwicklung des Kartensystems ist, nach HEBBERT (2014) die Bemühung Karten für Klimatope, Durchlüftungsverhältnisse und Planungshinweise automatisiert und objektiv mittels GIS aus Basisdaten zu generieren und

damit eine methodische Übertragbarkeit zu erreichen. Hierfür stehen die Arbeiten der „Baseler Schule“ (SCHERER et al. 1997, 1999, 2000, PARLOW et al. 2006, 2010), aber auch Studien aus Japan und Südkorea (MORIYAMA & TAKEBAYASHI 1999, YI et al. 2011, 2012).

### ***Berücksichtigung des Klimawandels***

Im Zuge des anthropogenen Klimawandels und seiner Auswirkungen auf lokaler Ebene sollten entsprechende Informationen in Stadtklimakarten aufgenommen werden (REUTER & KAPP 2012, LAU 2015, REN 2015). In Deutschland wird hierbei aufgrund der Entwicklungsgeschichte von *Klimaanalyse-* und *Planungshinweiskarten* insbesondere auf künftige Veränderungen thermischer Aspekte, wie städtische Wärmeinsel und Bioklima, fokussiert (VRS 2008, FRÜH et al. 2011, PTAK et al. 2013, KATZSCHNER & KUPSKI 2015). Seltener werden andere Klimawirkungen, wie Überschwemmungen durch Starkregen (BRANDL et al. 2011, KURMUTZ et al. 2012, STEINRÜCKE et al. 2013, 2016, WELSCH 2015) oder Trockenstress für die städtische Vegetation (KURMUTZ et al. 2012, STHA 2012, SCHMIDT 2016), in *Planungshinweiskarten* berücksichtigt. Diese Kartenwerke sind auf die Situation und Bedürfnisse einzelner Kommunen angepasst und hinsichtlich ihrer Inhalte und Darstellung nicht vergleichbar. Es besteht somit einerseits ein Bedarf an inhaltlicher Erweiterung bisheriger Stadtklimakarten um Aspekte des Klimawandels oder der Erstellung eigener *Planungshinweiskarten Klimaanpassung*. Andererseits sollten die Karten in Bezug auf Karteninhalte (Klimawirkungen) und Darstellungsform (Beschriftung, Schraffuren, Symbole) standardisiert werden, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen. Idealerweise werden diese Standards durch eine Fachorganisation erstellt und sind kostenfrei zugänglich.

## **2.4 Wärmebelastung für die Bevölkerung**

### **2.4.1 Auswirkungen von Wärmebelastung**

Zahlreiche Studien beschreiben die gesundheitlichen Auswirkungen von Hitzestress auf die urbane Bevölkerung. Zu den Risiken zählen u. a.:

- Herz-Kreislauf-Erkrankungen (KALKSTEIN & GREENE 1997, BASU & SAMET 2002, HAINES et al. 2006, MCMICHAEL et al. 2006, JENDRITZKY 2007, KOVATS & HAJAT 2008, LUBER & MCGEEHIN 2008, LIN et al. 2009, HUANG et al. 2010, ÅSTRÖM et al. 2011, GUIRGUIS et al. 2014, KIM et al. 2014),

- Atemwegserkrankungen (BASU & SAMET 2002, HAINES et al. 2006, MCMICHAEL et al. 2006, JENDRITZKY 2007, LUBER & MCGEEHIN 2008, MICHELOZZI et al. 2009, HUANG et al. 2010, GUIRGUIS et al. 2014, KIM et al. 2014),
- Zerebrovaskuläre Erkrankungen (BASU & SAMET 2002, HAINES et al. 2006, KOVATS & HAJAT 2008),
- Koronare Herzkrankheit (GOSLING et al. 2009),
- Chronisch obstruktive Lungenerkrankung (GOSLING et al. 2009),
- Geistes- und Verhaltensstörungen (HANSEN et al. 2008, GUIRGUIS et al. 2014).

Der durch die erhöhte Lufttemperatur bedingte Hitzestress macht es dem Körper schwer, genug Energie an die Umgebung abzugeben, um den Körper effektiv vor einer Überhitzung zu schützen, besonders bei gleichzeitig hoher Luftfeuchte (SCHERER & ENDLICHER 2013). Diese steigenden körperlichen Belastungen führen in der Konsequenz zu einer erhöhten Mortalität (KOVATS & HAJAT 2008, GOSLING et al. 2009, ANDERSON & BELL 2011, GABRIEL & ENDLICHER 2011, SCHERER et al. 2013) bzw. Morbidität (MICHELOZZI et al. 2009, ÅSTRÖM et al. 2011, SCHERBER et al. 2013, GUIRGUIS et al. 2014).

Die gesundheitlichen Risiken des Hitzestresses treffen nicht alle Menschen gleich stark. Vor allem ältere Menschen, Kinder und chronisch Kranke sind durch extreme Temperaturen besonders gefährdet (BASU & SAMET 2002, KOVATS & HAJAT 2008, GOSLING et al. 2009, ÅSTRÖM et al. 2011). Viele Studien weisen darauf hin, dass für die Beurteilung der gesundheitlichen Auswirkungen von Hitzeereignissen nicht nur die klimatische Komponente, sondern auch demographische und sozio-ökonomische Faktoren berücksichtigt werden müssen (HARLAN et al. 2006, LOUGHNAN et al. 2009, JOHNSON et al. 2012, MARAS et al. 2013, SCHERBER et al. 2013, KLEIN ROSENTHAL et al. 2014, MONTEIRO & VELHO 2014). BASU & SAMET (2002) sowie KOVATS & HAJAT (2008) nennen dahingehend als Determinanten für hitzebezogene Morbidität und Mortalität: Aufenthalt in Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen, fehlende Klimaanlage, geringer sozio-ökonomischer Status, Obdachlosigkeit, urbanes Wohnumfeld, geringe Mobilität, alleinstehend, Einnahme von Beruhigungsmitteln, Wohnen in oberen Etagen bei Mehrparteien-Häusern. Diese Ergebnisse stehen in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen zur sozialen Vulnerabilität gegenüber Umweltgefahren, wie sie vor allem durch CUTTER (1996) und CUTTER et al. (2000, 2003) vorgelegt wurden.

## 2.4.2 Verstärkung durch Hitzewellen, Klimawandel und Überalterung

Sommerliche Hitzewellen verstärken die gesundheitlichen Auswirkungen von Hitzestress für die Bevölkerung. In Europa führten besonders die Ereignisse der Jahre 2003, 2006 und 2010 zu einer erhöhten Mortalität. KOVATS & HAJAT (2008) geben einen Überblick über die Mortalität während der Hitzewellen in den letzten Jahrzehnten (Tabelle 3).

**Tabelle 3: Hitzewellenereignisse und damit verbundene Mortalität in Europa (verändert nach KOVATS & HAJAT 2008:43)**

Land bzw. Region	Zeitraum	Übersterblichkeit total und prozentuale Steigerung	Bezugszeitraum
London, Großbritannien	1976	9,7 % Anstieg in England und Wales, 15,4 % im Großraum London	Beweglicher 31-Tageszeitraum der täglichen Mortalität im gleichen Jahr
Portugal	Juli 1981	1.906 Tote in Portugal, 406 Tote in Lissabon	Geschätzte Werte
Rom, Italien	Juli 1983	35 % Anstieg in der 65+-Gruppe	Juli 1982
Athen, Griechenland	1987	Geschätzt mehr als 2.000 Tote	Regressionstrend
Portugal	21.-31. Juli 1991	997 Tote	Geschätzte Werte
London, Großbritannien	12.-21. Juli 1995	768 Tote (11,2 %) in England und Wales, 184 Tote (23 %) im Großraum London	Beweglicher 31-Tageszeitraum der täglichen Mortalität der letzten zwei Jahre
Niederlande	30. Juli - 3. August 1994	24,4 % Anstieg	Beweglicher 31-Tageszeitraum der letzten zwei Jahre
Italien	19.-31. Juli 2003	3.134 Tote (15 %) in 21 Städten	Gleicher Zeitraum 2002
Frankreich	1. Juni - 15. August 2003	14.802 Tote (60 %)	Durchschnitt im gleichen Zeitraum der Jahre 2000-2002
Portugal	1.-20. August 2003	1.854 Tote (40 %)	Gleicher Zeitraum 1997-2001
Spanien	1.-31. August 2003	3.166 Tote (8 %)	Gleicher Zeitraum 1990-2002
Schweiz	1.-31. August 2003	975 Tote (6,9 %)	Geschätzte Werte aus Regression
Niederlande	1. Juni - 31. August 2003	1.400 Tote	Anzahl der Grad über 72 °F multipliziert mit der geschätzten Zahl der Übertoten je Grad (25-35 Übertote)
Baden-Württemberg, Deutschland	1. Juni - 23. August 2003	1.410 Tote	Berechnungen auf Basis der Mortalität der letzten fünf Jahre
Belgien	1.-24. August 2003	1.297 Tote in der 65+-Gruppe	Durchschnitt im gleichen Zeitraum der Jahre 1985-2002
England und Wales	4.-13. August 2003	2.091 Tote (17 %), 616 Tote (42 %) im Großraum London	Durchschnitt im gleichen Zeitraum der Jahre 1998-2002

ROBINE et al. (2008) sprechen von mehr als 70 Tsd. zusätzlichen Todesfällen in Europa im Sommer 2003, JENDRITZKY (2007) von europaweit 55 Tsd., davon ca. 7 Tsd. in Deutschland. Für Australien und Neuseeland konstatiert MCMICHAEL (2003) jährlich etwa 1.100 Todesfälle für Menschen über 65 aufgrund extremer Hitzeereignisse. Die Hitzewelle vom 2006 führte in Frankreich zu 2.065 zusätzlichen Todesfällen bzw. einem Anstieg der Mortalität von 9 % (FOUILLET et al. 2008). Die Hitzewelle im Sommer 2010, die vor allem Osteuropa und Russland traf, verursachte nach vorsichtigen Schätzungen etwa 55 Tsd. Tote in Russland

(BARRIOPEDRO et al. 2011). Für die USA zeigten KALKSTEIN & GREENE (1997) einen Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Wetterlagen und einer Zunahme der Mortalität in 44 Millionen-Städten auf. ANDERSON & BELL (2011) haben das Mortalitätsrisiko während Hitzeperioden in 43 US-Städten untersucht und fanden die Mortalität in dieser Zeit um ca. 4 % erhöht. Das Mortalitätsrisiko erhöhte sich um 2,5 % pro 1 °F (ca. 0,6 °C) Temperaturzunahme bzw. 0,4 % pro Tag in Bezug auf die Zunahme der Länge der Hitzeperiode.

Der stattfindende Klimawandel führte bereits zu einer Zunahme der hitzebedingten Mortalität. ÅSTRÖM et al. (2013: 1050) kommen für Schweden zu dem Ergebnis, dass *„mortality from heat extremes in 1980-2009 was double what would have occurred without climate change.“* Die für die Zukunft projizierten klimatischen Änderungen werden zu einer weiteren Zunahme von Hitzewellen führen (vgl. Kapitel 2.2.1). Für die USA (Phoenix, Arizona) zeigen z. B. GROSSMAN-CLARKE et al. (2014) bei der Auswertung eines Ensembles von zehn Klimamodellen eine Versechsfachung der Häufigkeit von Extremereignissen und eine Vervierzehnfachung der mittleren Anzahl der Hitzetage pro Sommer zwischen den Perioden 1971-2000 und 2041-2070. Diese Zunahme an Hitzeextremen wird sich auf die Mortalität auswirken. Laut GOSLING et al. (2009) gibt es zwar Unsicherheiten bzgl. Bevölkerungsentwicklung, Anpassungsvermögen und verwendeten Klimamodellen, jedoch weisen Studien auf eine Zunahme der Mortalität im Zuge des Klimawandels hin: DONALDSON et al. (2001) beziffern den Anstieg hitzebedingter Mortalität in Großbritannien bis 2050 auf 253 %. KALKSTEIN & GREENE (1997) schätzen den Anstieg der sommerlichen Mortalität in 44 US-Städten bis 2050 auf über 70 %. KOPPE (2005) kommt zu einem 20 %-Anstieg der hitzebedingten Mortalität für Baden-Württemberg bis 2050. MCMICHAEL (2003) geht von einer erheblichen Zunahme hitzebezogener Todesfälle in Australien und Neuseeland bis 2050 aus. Gleichzeitig wird der Rückgang der kältebedingten Mortalität im Vergleich als geringer eingeschätzt (GOSLING et al. 2009).

Aufgrund des demographischen Wandels in der westlichen Welt werden, unabhängig vom Klimawandel als zusätzlichen Treiber, künftig mehr Menschen stärker von Hitzestress betroffen sein als bisher (MCMICHAEL et al. 2006). Auch LUBER & MCGEEHIN (2008) sehen eine künftige Verschärfung der hitzebezogenen Mortalität aufgrund demographischer Trends. Für die USA wird angenommen, dass sich die Anzahl der ab-65-Jährigen zwischen 2000 und 2060 fast verdreifachen wird, was einem Anstieg dieser Bevölkerungsgruppe von ca. 12 % auf über 20 % entspricht (WILMOTH 2006). In Deutschland könnte der Anstieg laut 13. koordinierter Bevölkerungsvorausberechnung (kBV) noch dramatischer ausfallen (SBA 2015a): zwischen 2013 und 2060 soll sich der Anteil der ab-65-Jährigen von ca. 21 % auf 33 % erhöhen.

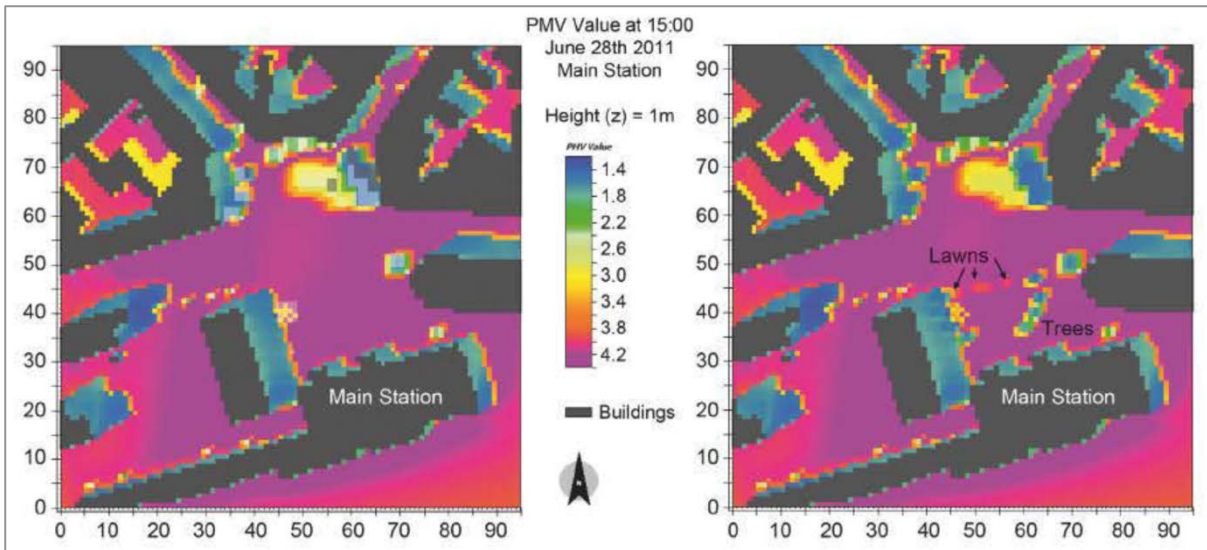


### 2.4.3 Operationalisierung

Die vorausgegangenen Ausführungen zeigen, dass ein Ansatz zur Bestimmung der Wärmebelastung die Komponenten Klimasignal und Sensitivität der Bevölkerung berücksichtigen muss. Die Bestimmung der Wärmebelastung kann mittels Wirkmodellen und Indikatorenansätzen erfolgen. Als Wirkmodelle fungieren im Allgemeinen numerische Simulationsmodelle, die aufgrund der rechentechnischen Anforderungen nur auf einen begrenzten Raumausschnitt angewendet werden können. In der Folge werden sie vor allem auf Quartiers- bzw. Stadtteilbene eingesetzt und dienen der Quantifizierung der Auswirkungen von Bauvorhaben auf das Mikroklima oder die Wärmebelastung der Bevölkerung. Zur Bestimmung des Hitzestresses werden thermische Indizes wie *PMV* (*predicted mean vote*, FANGER 1972), *PET* (*physiological equivalent temperature*, MATZARAKIS et al. 1999, HÖPPE 1999), *GT* (gefühlte Temperatur) oder *UTCI* (*universal thermal climate index*, BŁAŻEJCZYK et al. 2012, JENDRITZKY et al. 2012) genutzt. *PMV*, *GT* und *PET* werden durch den Verein Deutscher Ingenieure zur Bestimmung der bioklimatischen Belastungssituation des Menschen empfohlen (VDI-KRL 2008).

Es gibt eine Vielzahl von Modellen, die im städtischen Kontext angewendet werden können. Eines der bekanntesten Modelle ist *ENVI-met*, das von BRUSE & FLEER (1998) entwickelt wurde und in Deutschland (DÜTEMEYER et al. 2013, FRÖHLICH & MATZARAKIS 2013, MARAS et al. 2013, MÜLLER et al. 2014) sowie international häufig verwendet wird (ALI-TOUDERT & MAYER 2006, FAHMY et al. 2010, KRÜGER et al. 2011, HIEN et al. 2012, JOHANSSON et al. 2013, SZÜCS 2013, SODOUDI et al. 2014). Abbildung 8 (S. 28) zeigt die Anwendung von *ENVI-met* zur Beurteilung des Hitzestresses mittels *PMV*. Ein anderes Modell ist *RAYMAN*, das von MATZARAKIS & RUTZ (2005) bzw. MATZARAKIS et al. (2006, 2007) entwickelt wurde. Das Bioklima-Modell *RAYMAN* kann die thermischen Indizes *PET*, *PMV* und *UTCI* berechnen und wird vielfältig eingesetzt (ÉGERHÁZI et al. 2009, LIN et al. 2010, KETTERER & MATZARAKIS 2014). Des Öfteren werden *ENVI-met* und *RAYMAN* auch in Kombination genutzt (GOLDBERG et al. 2013, YAHIA & JOHANSSON 2014, TALEGHANI et al. 2015). Modelle die auf gesamtstädtischer Ebene angewendet werden können sind *UBIKLIM* (BEHRENS & GRÄTZ 2009) und *MUKLIMO\_3* (SIEVERS 2012) des Deutschen Wetterdienstes (DWD). *UBIKLIM* wurde z. B. zur Berechnung der Tage mit Wärmebelastung unter Klimawandelbedingungen für Berlin genutzt (BEHRENS & GRÄTZ 2009), *MUKLIMO\_3* für entsprechende Stadtklimaanalysen in Frankfurt/Main und Jena (FRÜH et al. 2011, HOFFMANN et al. 2014). Oft fließen Daten aus Geländemessungen in die Modellierungen ein oder werden durch sie

validiert (KRÜGER et al. 2011, MARAS et al. 2013, HOFFMANN et al. 2014, MÜLLER et al. 2014). Ebenso können Fernerkundungsdaten wie Landnutzung, *NDVI* oder Geländemodell zur Verbesserung bioklimatischer Modellierungen herangezogen werden (HELDENS 2010, HOECHSTETTER et al. 2010, KIM et al. 2014). Gelegentlich werden Interviews genutzt, um die subjektive Belastungssituation vor Ort zu erfassen und die Modellergebnisse zu validieren (MARAS et al. 2013).

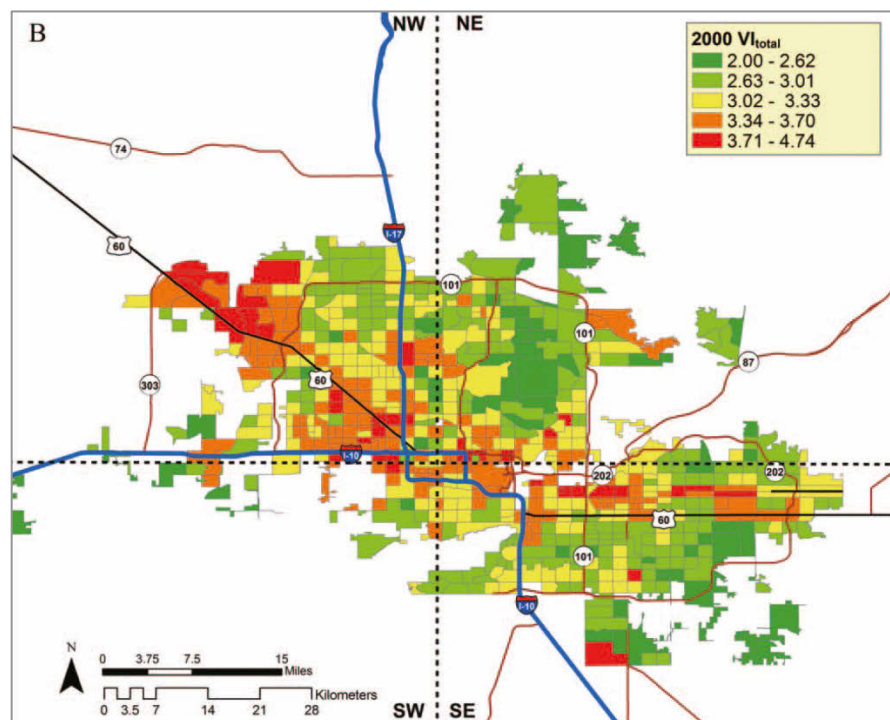


**Abbildung 8:** Ermittlung des Hitzestresses mit ENVI-met. Simulierte PMV-Werte für den Hauptbahnhof Aachen, links: heutige Situation, rechts: mit verbesserter Vegetation (MARAS et al. 2013:298)

Die Anwendung von Simulationsmodellen schafft vergleichbare, hochaufgelöste Ergebnisse in Form thermischer Indizes (*PMV*, *PET*, *PT*, *UTCI*). Die Abbildung einer ganzen Stadt ist jedoch nicht oder nur mit erheblichem Aufwand realisierbar. Gleichzeitig wird nur die klimatische Komponente der Wärmebelastung, nicht jedoch die Sensitivitäten der Bevölkerung, in den Modellen ausreichend berücksichtigt. Des Weiteren sind die Anforderungen an Rechen-technik und Fachwissen sehr hoch, so dass die Verwendung von Wirkmodellen für die Aufgabenstellung und den Anwenderkreis nicht geeignet ist.

Sind die rechentechnischen und fachlichen Ressourcen zur Anwendung numerischer Simulationsmodelle nicht vorhanden, kann auf Indikatorenansätze zurückgegriffen werden. Sie ermöglichen eine erste größenmäßige Bestimmung der Wärmebelastung in Teilräumen eines Untersuchungsgebietes. Ein gutes Beispiel für einen indikatorbasierten Ansatz liefern CUTTER et al. (2000). Sie verknüpfen im GIS einen Indikator für Natur- und Umweltgefahren (Erdbeben, Überschwemmung, Hurrikane, Waldbrand, Chemieunfälle etc.) mit einem Indikator der sozialen Vulnerabilität (*social vulnerability index*, *SoVI*) zur räumlich differenzierten *place vulnerability*. Die Wärmebelastung wird von CHOW et al. (2012) für Phoenix, Arizona (USA)

anhand von Indikatoren zu *physical exposure* (Juni-Temperaturen, *NDVI*) und *adaptive capacity* (Senioren- und Ausländeranteile, Haushaltseinkommen) bestimmt und für unterschiedliche Zeitschnitte gegenübergestellt. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis des Hitzevulnerabilitätsindikators für das Jahr 2000. REID et al. (2009) entwerfen auf Basis von zehn Vulnerabilitätsfaktoren (u. a. Bildungsgrad, Landnutzung, Vorhandensein von Klimaanlage) einen Hitzeindex. Auch JOHNSON et al. (2012) verwenden den Ansatz von CUTTER et al. (2000) und verbinden Parameter der sozialen Vulnerabilität (u. a. Altersgruppen, Einkommen, Bildungsstand) mit Fernerkundungsdaten (*NDVI*, Oberflächentemperatur) zu einem *extreme heat vulnerability index (EHVI)*. KLEIN ROSENTHAL et al. (2014) analysieren die hitzebezogene Mortalität von Senioren in New York City, New York (USA), anhand demographischer und sozio-ökonomischer Parameter (u. a. Einpersonenhaushalte, Einkommen, Bildungsstand, ethnische Zusammensetzung) und Daten zur Wohnumgebung (u. a. Flächennutzung, Oberflächentemperatur). AUBRECHT & ÖZCEYLAN (2013) schließlich verbinden in ihrer Analyse für den Großraum Washington, D.C. (USA), GIS-gestützt einen Hitzestressindex (Hitzewellentage) und einen Hitzestressvulnerabilitätsindex (u. a. Alter, ökonomischer Status, Landnutzung) zu einem Hitzestressrisikoindex.



**Abbildung 9:** Ermittlung der Hitzevulnerabilität mittels Indikatorenansatz. Anwendung auf Ebene von census tracts für das Jahr 2000 für Phoenix, Arizona (USA) (CHOW et al. 2012:294)

In Europa entwickelten WOLF et al. (2009, 2013) einen, auf Hitzerrisikofaktoren (u. a. Anteil Senioren, Einpersonenhaushalte, Geringverdiener) basierenden, Hitzevulnerabilitätsindex, den sie mit Oberflächentemperaturen verschnitten und auf den Großraum London anwendeten.

SCHERBER et al. (2013) untersuchten für Berlin anhand eines sozialen Index, der Bevölkerungsdichte und der Tage mit Hitzebelastung das Risiko der >64-Jährigen für Krankenhauseinlieferungen im Sommer. GUILLARD-GONÇALVES et al. (2014) übertragen den *social vulnerability index (SoVI)* von CUTTER et al. (2003) auf europäische Verhältnisse. Sie verbinden den Indikator mit Bereichen von Naturgefahren (u. a. Erdbeben, Sturzfluten, Erdrutsche) in der Region Lissabon, Portugal, und leiten Risikozonen für die Bevölkerung ab. BUTH et al. (2015) verbinden zur Bestimmung der Hitzebelastung in ihrer Vulnerabilitätsstudie für Deutschland die Bevölkerungsgruppe der Über-60-Jährigen, ein Wärmeinselpotenzial und die Anzahl heißer Tage.

Indikatorenansätze sind geeignet, die Sensitivitäten der Bevölkerung in Bezug auf die Wärmebelastung sowie den Wärmeinseleffekt zu beschreiben und mit einem Klimasignal zu verbinden. Auch die generell einfache Anwendung und Anpassbarkeit sowie die Möglichkeit der Nutzung vorhandener Basisdaten sprechen für einen Einsatz der Methodik hinsichtlich der Aufgabenstellung und des Anwenderkreises.

## **2.5 Trockenstress für die Vegetation**

### **2.5.1 Auswirkungen von Trockenstress**

Nach ROLOFF (2013) ist Stress ein Belastungszustand, der aufgrund von erheblichen Abweichungen vom optimalen Zustand zu Schädigungen führen kann. Alle Standort- und Umweltfaktoren der Vegetation können potenziell stressauslösend sein, wenn ein Optimal- bzw. Toleranzbereich verlassen wird. Bei der Wasserversorgung kann ein Mangel, aber auch ein Überschuss, zu Stress führen. Der Stress bewirkt bei Überschreitung der Anpassungsamplitude Funktionsausfälle und letztlich den Tod der Pflanze. Da Pflanzen Stress nicht durch Ortswechsel ausweichen können, haben sie Mechanismen zur Stressreduktion entwickelt (u. a. Schließung der Spaltöffnungen, Blattabwurf, nadelartige Blätter, Anlage von Stammspeicher, tiefreichende Pfahlwurzel). Standort- und Umweltfaktoren bestimmen das Vorkommen von Pflanzenarten an einem Ort und somit ihre Verbreitungsgrenzen. Die wichtigsten Standortfaktoren für die Vegetation sind Boden und Klima, die über den Wasserhaushalt eng miteinander verbunden sind. Die Wasserverfügbarkeit hängt neben Höhe und Verteilung des Niederschlags auch von der Verdunstung, der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens und dem Wasserbedarf der Pflanze ab. Es besteht ein starker Zusammenhang zwischen Biomassebildung und Wasserverbrauch. Bei Wassermangel ist die Transpiration der Pflanze eingeschränkt und die Stoffproduktion und damit das Pflanzenwachstum vermindert (CHMIELEWSKI 2007).

Nach CATTIVELLI et al. (2008) ist Trockenheit weltweit der größte Stressfaktor im Ackerbau. Wenn im Frühjahr und Sommer hohe Temperaturen und geringer Niederschlag mit erhöhtem Wasserbedarf der Pflanzen zusammentreffen, kann das pflanzenverfügbare Wasser schnell aufgebraucht sein und es zu Trockenstress kommen. Für einjährige Kulturpflanzen ist eine mangelhafte Wasserversorgung besonders zwischen April und Juni kritisch (SCHÖNTHALER et al. 2015). Trockenheit zu Vegetationsbeginn kann Auswirkungen auf das Keimen und Aufgehen von Ackerkulturen haben, eine Sommertrockenheit verkürzt die effektive Entwicklungsdauer, wodurch Fruchtbildung und -qualität leiden. Gleichzeitig nimmt bei zu geringer Bodenfeuchte die Verfügbarkeit von Nährstoffen ab und die Anfälligkeit für Winderosion zu (SCHALLER et al. 2007). Ausgeprägte sommerliche Trockenheit führt bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zu Ertragseinbußen (CHMIELEWSKI 2007, SCHALLER et al. 2007).

Bäume sind im Vergleich zu landwirtschaftlichen Pflanzen aufgrund ihrer langen Lebensdauer in besonderem Maße einer Vielzahl von Stressfaktoren ausgesetzt. Dazu zählen extreme Temperaturen, hohe Lichtintensitäten, Pathogenbefall, Wasser- und Nährstoffmangel (ROLOFF 2013). Wie schnell sie wachsen und wie viel Holzzuwachs sie erreichen, ist vor allem von der Nährstoff- und Wasserversorgung am Standort sowie den vorherrschenden Temperaturen abhängig (SCHÖNTHALER et al. 2015). Gleichwohl Bäume auf naturnahen Standorten ähnlichen Umweltbedingungen wie Ackerpflanzen ausgesetzt sind, sind die Belastungen für Stadt- bzw. Straßenbäume besonders extrem. Dabei kann ein Gradient abnehmender Naturnähe und zunehmender Belastungen festgestellt werden: Stadtwälder > Parkbäume > Straßenbäume (SÆBØ et al. 2005). Stadt- und Straßenbäume erfahren aus folgenden Gründen oft und intensiv Trockenstress (SÆBØ et al. 2003, 2005, SIEGHARDT et al. 2005, ROLOFF 2013, MULLANEY et al. 2015):

- Trocken-warmes Stadtklima
- Starke Einstrahlung, Rückstrahlung, Überwärmung
- Freistand mit wenig Beschattung
- Begrenzter und gestörter Wurzelraum
- Bodenverdichtung
- Bodenversiegelung, erhöhter Oberflächenabfluss
- Verwendung von Streusalz
- Baumaßnahmen, Wurzelschäden

Die Artzusammensetzung von städtischen und forstlich genutzten Standorten differiert sehr stark. Detaillierte wissenschaftliche Erkenntnisse zur Trockenheits- und Stadtklimaverträglichkeit verschiedener Baumarten liegen bisher nur unzureichend vor. Dies ist umso kritischer zu sehen, als Park- und Straßenbäume einer, durch den Klimawandel zunehmenden, Belas-

tung durch Hitze und Lufttrockenheit entgegenwirken und zu einer deutlichen Verbesserung des Bioklimas beitragen können (GILLNER & ROLOFF 2014).

### **2.5.2 Verstärkung durch den Klimawandel**

Eine längere Vegetationsperiode und höhere Wärmesummen im Frühjahr und Sommer, wie sie für den Klimawandel projiziert werden, wirken sich bei ausreichender Wasserversorgung positiv auf das Wachstum vieler Pflanzenarten aus. Auch stimuliert die höhere atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration die Photosynthese und das Pflanzenwachstum. Andererseits führen die Auswirkungen des Klimawandels, wie höhere Temperaturen, häufigere Trockenphasen und geringere Niederschläge im Sommerhalbjahr (vgl. Kapitel 2.2.1), zu Ertrags- bzw. Qualitätseinbußen bei Kulturpflanzen. Auch Bäume die heute noch gut auf einem Standort gedeihen, können durch den Einfluss des Klimawandels in den kommenden Jahrzehnten bereits anfälliger für Schäden sein und nur noch geringe Zuwächse aufweisen (SCHÖNTHALER et al. 2015). Die klimatischen Veränderungen haben vielfältige Auswirkungen auf Agrarkulturen sowie Wald- und Forstbestände, die durch zahlreiche Studien weltweit belegt sind. Folgende Auswirkungen sind im Spannungsfeld Temperatur, Trockenheit und Wachstum besonders relevant (IPCC 2014b):

- Rückgang der Ernteerträge bei Zunahme der lokalen Jahresmitteltemperatur für wichtige Feldfrüchte wie Weizen, Mais, Reis, Soja (NELSON et al. 2009, CISCAR et al. 2011, IGLESIAS et al. 2012, SUPIT et al. 2012, OSBORNE et al. 2013, ROSENZWEIG et al. 2013, 2014, SCHÖNTHALER et al. 2015),
- Hitzeschäden an Kulturpflanzen durch eine zunehmende Anzahl an Tagen und Nächten mit hohen Temperaturen (PORTER & GAWITH 1999, PENG et al. 2004, SCHLENKER & ROBERTS 2009, WASSMANN et al. 2009, WELCH et al. 2010, LOBELL et al. 2013, TEIXEIRA et al. 2013) und an Bäumen durch Hitzewellen (CIAIS et al. 2005, ALLEN et al. 2010),
- Zunahme des Trockenstressses für landwirtschaftliche Kulturpflanzen durch hohe Temperaturen (CIAIS et al. 2005, BARRIOPEDRO et al. 2011, TRNKA et al. 2011, LOBELL et al. 2013) sowie verringertes Baumwachstum, erhöhte Baumsterblichkeit und Waldrückgang aufgrund verstärkten Trockenstressses (BARBER et al. 2000, WELP et al. 2007, HOGG et al. 2008, ALLEN et al. 2010, PARENT & VERBYLA 2010, PORTER & PISARIC 2011, GRIESBAUER & GREEN 2012, GILLNER et al. 2013, WILLIAMS et al. 2013),

- Häufigere Waldbrände aufgrund höherer Temperaturen und Trockenperioden (LAVALLE et al. 2009, LINDNER et al. 2010, CARVALHO et al. 2011, DURY et al. 2011, WITTE et al. 2011, PAUSAS & FERNÁNDEZ-MUÑOZ 2012, LASCH-BORN et al. 2015),
- Ernteverluste bei Feldfrüchten durch bessere Überdauerung und stärkere Verbreitung von Schadorganismen, Pflanzenkrankheiten und Unkräutern vor allem infolge höherer Jahresmitteltemperaturen (OERKE 2006, HELLMANN et al. 2008, LUCK et al. 2011, ZISKA et al. 2011) und Zunahme von Baumschäden durch Schadorganismen und Pflanzenkrankheiten infolge besserer Überdauerungs- und Ausbreitungsmöglichkeiten (SEIDL et al. 2008, UNFAO 2008, JÖNSSON et al. 2009, 2011, KASSON & LIVINGSTON 2012, LASCH-BORN et al. 2015),
- Verlängerung der Vegetationsperiode infolge höherer Jahresmitteltemperaturen bei Ackerpflanzen (CHMIELEWSKI et al. 2004, CLELAND et al. 2007, POTOPOVÁ et al. 2015) und Bäumen (MENZEL & FABIAN 1999, CHMIELEWSKI & RÖTZER 2002, CHMIELEWSKI et al. 2005, LINDERHOLM 2006, SCHEFFLER & FRÜHAUF 2011),
- Erhöhung der Ernteerträge, vor allem von C<sub>3</sub>-Pflanzen, infolge der Erhöhung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Anteils und des damit verbundenen Düngeeffektes (LEAKEY 2009, DAMATTA et al. 2010, AMTHOR 2001; MCGRATH & LOBELL 2011) sowie höherer Holzzuwachs aufgrund höherer Jahresdurchschnittstemperaturen und höheren atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Anteils (MCGUIRE et al. 2007, GOLDBLUM & RIGG 2010, LINDNER et al. 2010, BECK et al. 2011),
- Zunahme von bewirtschafteten Flächen bzw. Ausdehnung des Anbaus von Kulturpflanzen in Höhenlagen und höheren Breiten infolge steigender Jahresmitteltemperaturen (BINDI & OLESEN 2011, SCHAFLEITNER et al. 2011, ZHANG & CAI 2011) und Verschiebung von Wäldern polwärts und in höhere Höhen (IVERSON & PRASAD 2002, HAMANN & WANG 2006, CHMIELEWSKI 2007, OGAWA-ONISHI et al. 2010, CHMURA et al. 2011, HICKLER et al. 2012, PEARSON et al. 2013).

Die Schäden an Ackerpflanzen und Waldbäumen sowie die damit einhergehenden Ertragseinbußen können somit zum Großteil auf Trockenstress infolge klimatischer Veränderungen, wie höhere Temperaturen und damit stärkere Verdunstung sowie geringere Niederschläge während der Vegetationszeit, zurückgeführt werden. Mit der projizierten Temperaturerhöhung und der Zunahme von Extremereignissen (u. a. Hitzewellen, Trockenperioden) wird sich diese Entwicklung fortsetzen.

Global wird die Mehrheit der Agrarregionen negative Auswirkungen bzgl. der Erträge erfahren, während einige Regionen von den Klimaveränderungen profitieren können. Jedes weitere Jahrzehnt wird die Erträge um durchschnittlich 1 % verringern, wohingegen etwa 14 % Zuwachs pro Dekade notwendig sind, um den steigenden Bedarf zu decken (IPCC 2014b). Die Klimaauswirkungen werden auch in Europa regional unterschiedlich ausfallen (IPCC 2014b, UNFAO 2016). Südeuropa wird die höchsten Ertragsrückgänge erfahren, während für Mitteleuropa sowohl leichte Zu- als auch Abnahmen projiziert werden. In Nordeuropa sind Ertragssteigerungen durch die milderen Temperaturen und die Ausdehnung der klimatisch geeigneten Anbauflächen wahrscheinlich (BINDI & OLESEN 2011, CISCAR et al. 2011).

Für Wald und Forstwirtschaft bedeuten die projizierten klimatischen Veränderungen vermehrten Trockenstress, einen Rückgang des Holzzuwachses, erhöhte Baumsterblichkeit und Verschiebungen in den Verbreitungsgebieten der Baumarten. Projektionen zur Baumsterblichkeit aufgrund von Klimastress sind derzeit sehr unsicher. Die meisten Vegetationsmodelle berücksichtigen dies laut IPCC (2014b) nur unzureichend. CHOAT et al. (2012) fanden in einer globalen Studie mit 81 Untersuchungsgebieten heraus, dass sich gegenwärtig 70 % von 226 untersuchten Baumarten nahe der Grenze ihrer Trockenstresstoleranz befinden. Die Studie spricht dafür, dass trockenheits- und temperaturbedingter Stress nicht auf aride und semiaride Wälder begrenzt sein wird. Selbst für einige tropische Regionen werden geringere Niederschläge und strengere Trockenperioden projiziert (MALHI et al. 2009, SHIOGAMA et al. 2011). Gleichzeitig zeigen Studien, dass die Erholungsphasen nach Trockenstressphasen länger andauern als die Wiederkehrintervalle der Trockenperioden, was einen verstärkenden, sich kumulierenden Effekt mehrerer Trockenphasen für die Bäume bedeutet (MUELLER et al. 2005, ANDEREGG et al. 2013, SAATCHI et al. 2013).

Die Standortbedingungen für Stadtbäume sind bereits heute durch Wassermangel und Hitzestau gekennzeichnet. In Zukunft ist mit einer signifikanten Verschlechterung der Lebensbedingungen für Park- und Straßenbäume in Städten zu rechnen (ROLOFF et al. 2008, GALKAKSB 2009). Die aufgeführten Auswirkungen des Klimawandels auf Wald- und Forstbestände gelten auch für Stadtbäume. Der Klimawandel wird jedoch die Effekte des Stadtklimas weiter intensivieren (vgl. Kapitel 2.2.2), so dass sich die Klimaänderungen für Stadtbäume vergleichsweise stärker auswirken werden als für Bäume auf Wald-, Forst- und Offenlandstandorten. Gleichzeitig dienen Stadtbäume aufgrund der Verbesserung des urbanen Bioklimas als Anpassungsmaßnahme gegen Wärmebelastung. Damit steht nach ROLOFF et al. (2008) der künftig wachsenden Bedeutung der Stadtbäume eine zunehmende Gefährdung



durch sommerliche Hitze- und Trockenperioden gegenüber. Seit einigen Jahren gibt es Praxistests, um zukunftsfähige Gehölze für den urbanen Raum zu finden. In Deutschland sind dies z. B. das *Projekt Stadtgrün 2021* der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (EPPEL et al. 2012, 2015) und die Straßenbaumtests des Deutschen Gartenamtsleiterkongresses e.V. (GALK, GALK-AKSB 2014). Deren Ergebnisse können jedoch nur erste Hinweise liefern, die durch die künftig veränderte klimatische Realität ihre Prüfung erfahren werden. Bisher befassen sich wenige Studien explizit mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Stadtbäume (z. B. SUKOPP & WURZEL 2003, LU et al. 2006, ROLOFF et al. 2009, YANG 2009). Der Fokus liegt eher auf Stadtbäumen als Anpassungsmaßnahme bzw. Kohlenstoffspeicher. Auch in den Veröffentlichungen des IPCC (2001, 2007, 2014b) finden Stadtbäume bisher keine größere Beachtung. Differenzierte Vergleichsstudien zu den durch den Klimawandel eingetretenen und projizierten Veränderungen für Stadtbäume, ähnlich den bereits angeführten für Land- und Forstwirtschaft, existieren bisher nicht. Auch dies steht im Kontrast zur wachsenden Bedeutung von Bäumen im urbanen Raum unter künftigen klimatischen Verhältnissen und begründet einen erhöhten Forschungsbedarf.

### 2.5.3 Operationalisierung

#### *Trockenstress auf Ackerflächen*

Zur Bestimmung des Trockenstress auf Ackerflächen muss zwischen kurz- und langfristigen Zeiträumen unterschieden werden. Erstere umfassen das Agrarwetter und das Agrarklima. Beim Agrarwetter steht das Monitoring des aktuellen Wetters und dessen Aufbereitung für die Landwirtschaft im Vordergrund. Einen längeren Zeitraum umfasst das Agrarklima mit Vorhersage und Monitoring von meteorologischen, landwirtschaftlichen und hydrologischen Dürren. Damit lassen sich Aussagen treffen, ob ein aktueller Zeitraum – wenige Monate bis ein Jahr – in Bezug zu einem Basiszeitraum besonders trocken oder feucht ist (DWD 2016a). Im vorliegenden Fall geht es jedoch um die Bewertung der langfristigen standörtlichen Bedingungen der Ackerflächen in Bezug auf Trockenstress. Hierzu kann auf die Wirkzusammenhänge des Bodenwasserhaushalts zurückgegriffen werden. Für die Pflanze steht während der Vegetationszeit das Wasser zur Verfügung, was sie aus Niederschlag, Grundwasser und Bodenwasserspeicher entnehmen kann (SCHEFFER et al. 2010). Der Anteil und die Menge des Niederschlags, welcher letztlich zur Verfügung steht, ist abhängig von den klimatischen Bedingungen des Standortes und wird durch die klimatische Wasserbilanz (KWB) als Differenz aus Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration charakterisiert (DIN 1994). Positi-

ve Werte der klimatischen Wasserbilanz beschreiben Wasserüberschuss, negative Werte einen Wassermangel. Die Gefährdung der Vegetation durch Trockenheit kann der AG BODEN (2005) zufolge durch Teilbilanzen der KWB während kritischer Vegetationsabschnitte des Sommerhalbjahres in Verbindung mit der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes und des kapillaren Aufstiegs aus dem Grundwasser beurteilt werden. Dabei liefert die KWB eine Aussage zum standörtlichen Klima, die Grundwasseranbindung und der Bodenwasserspeicher Informationen über die Sensitivität des Bodens gegenüber Klimaänderungen. Die Summe aus nutzbarer Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ( $nFKWe$ ) und kapillarem Aufstieg ( $KA$ ) ist das pflanzenverfügbare Bodenwasser ( $W_{pfl}$ ); bei grundwasserfernen Standorten ist es gleich der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (AG BODEN 2005, SCHEFFER et al. 2010).

Ein Anwendungsbeispiel für diese Methodik liefern BUTH et al. (2015) für Deutschland auf Landkreisebene. Sie verwenden die effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode (Mai bis August) zur Beschreibung der klimatischen Bedingungen. Unterschiedliche Feldfrüchte besitzen jedoch differierende Wachstumszeiten und -längen und somit zeitlich abweichende Wasseransprüche. Diese können sich z. B. zwischen September bis Juli (Winterroggen), April bis August (Hafer) oder Mai bis Oktober (Mais) bzw. zwischen 321 Tagen (Winterraps) und 124-131 Tagen (Sommergerste) bewegen (SCHEFFER et al. 2010, CHMIELEWSKI 2013). Dabei kann Wassermangel auch zu Vegetationsbeginn im Frühjahr zu Wachstumshindernissen und Pflanzenschäden führen (SCHALLER et al. 2007, DRASTIG et al. 2011, BUCHNER et al. 2012). Gleichzeitig nutzen BUTH et al. (2015) in ihrem Ansatz vereinfachte Annahmen für die Bestimmung des Niederschlags und der Evapotranspiration in der Hauptvegetationsperiode nach AG BODEN (2010). Hier würden die Anwendung der KWB in der zeitlich umfänglicheren thermischen Vegetationsperiode und die Nutzung realer Werte des Untersuchungsraumes realistischere Ergebnisse liefern. Die konkreten Wasseransprüche von Feldfrüchten werden bei BUTH et al. (2015) nicht betrachtet. Die zusätzliche Betrachtung von Feldfrüchten führt in der Konsequenz zur Anwendung von Wirk- bzw. Ertragsmodellen, die für konkrete Standorte und deren Anbaubedingungen (u. a. Klima, Boden, Relief) Ertragsquantitäten liefern, wie z. B. in Thüringen mittels *YIELDSTAT* durch MIRSCHEL et al. (2014).

Die Gegenüberstellung von pflanzenverfügbarem Wasser und klimatischer Wasserbilanz während der Vegetationsperiode eignet sich grundsätzlich zur Bewertung des Trockenstress auf einem Ackerstandort. Eine zusätzliche Modifikation dieses Ansatzes dürfte zu realistischeren

Ergebnissen führen. Die Methodik ist darüber hinaus mittels Indikatoransatzes operationalisierbar und durch den avisierten Anwenderkreis leicht und schnell anwendbar.

### ***Trockenstress auf Waldflächen***

Auch bei dem Trockenstress auf Waldflächen kann zwischen kurz- und langfristiger Betrachtung unterschieden werden. Kurzfristige Methoden zielen, ähnlich zum Trockenstress auf Ackerflächen, auf ein Monitoring und kurzfristige Prognosen ab. Diese sind als Ansatz für die vorliegende Fragestellung nicht geeignet. Weiterhin existieren komplexe Wirkmodelle, die auf Basis von Wasserbilanzen Trockenstressrisiken für große Areale modellieren können (z. B. ZIERL 2001, CÁCERES et al. 2015, SUN et al. 2015). Oft werden zudem Fernerkundungsdaten in Kombination mit GIS eingesetzt, um trockenstressgefährdete Waldgebiete zu kartieren (VOLCANI et al. 2005, BAGUSKAS et al. 2014, ASSAL et al. 2016). Auch diese methodischen Ansätze sind für eine Anwendung durch kommunale Akteure infolge des hohen Wissens- und Datenbedarfs nicht tauglich. In der forstlichen Praxis stehen hierzulande Ansätze in der Diskussion, die sich mit der Eignung heimischer und fremdländischer Waldbaumarten unter künftigen Klimabedingungen beschäftigen und der gewünschten Zielstellung näher kommen. Infolge der Langlebigkeit von Bäumen, im Gegensatz zu meist einjährigen Kulturpflanzen der Landwirtschaft, sollten hier bei der Bewertung des Trockenstressrisikos die Wasseransprüche der Baumarten explizit berücksichtigt werden. Methodische Ansätze, die dies nicht tun, werden deshalb nicht näher betrachtet.

KÖLLING (2007) legt *Klimahüllen* für 27 Waldbaumarten vor, die auf dem Konzept der *climate envelope models* beruhen. Abbildung 10 (S. 38) zeigt beispielhaft die *Klimahülle* für die Rotbuche. Für die *Klimahüllen* werden die heutigen und künftigen Verbreitungsgebiete der Baumart in einem Diagramm aus Jahresdurchschnittstemperatur und Jahresniederschlag dargestellt. Daran kann abgelesen werden, welche Baumart unter veränderten Klimabedingungen an ihre klimatischen Grenzen stößt. Die Methodik wurde kritisiert, da sie u. a. die Standorteigenschaften, und damit den Wasserhaushalt der Böden, nicht berücksichtigt und die ökologische anstatt der physiologischen Amplitude der Baumarten verwendet (BOLTE et al. 2008, ROLOFF & GRUNDMANN 2008). Die Methodik wurde zur Erstellung von Klima-Risikokarten für Fichte und Buche in Bayern genutzt (KÖLLING et al. 2009). Durch FALK et al. (2013) wurde der Ansatz um Boden- und Reliefparameter erweitert und Anbaurisikokarten für 21 Baumarten vorgelegt.

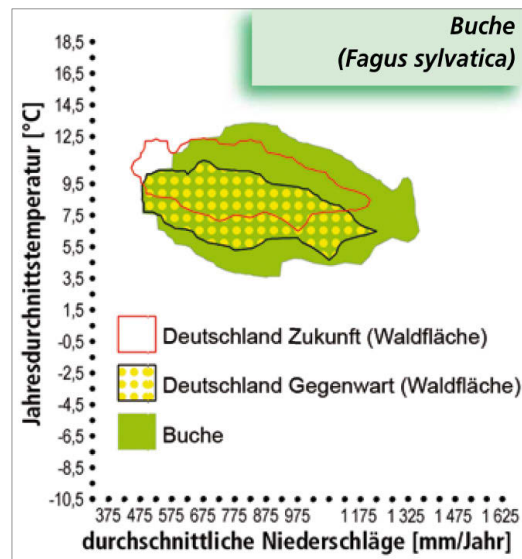


Abbildung 10: Klimahülle für die Buche (*Fagus sylvatica*) (KÖLLING 2007:1244)

In Mittel- und Norddeutschland findet das Konzept von SPELLMANN et al. (2011) Anwendung. Hierbei werden, ähnlich den landwirtschaftlichen Ansätzen, Kennwerte zum Bodenwasserhaushalt (nutzbare Feldkapazität) und den Klimabedingungen (KWB) für die fünf Hauptbaumarten, Fichte, Buche, Eiche, Kiefer und Douglasie, aggregiert und ein baumartenspezifisches Trockenstressrisiko ausgewiesen. Auch dieser Ansatz ermöglicht eine Berücksichtigung künftiger Klimabedingungen über die klimatische Wasserbilanz. Als Mangel des Konzepts erweist sich die geringe Anzahl der berücksichtigten Baumarten, so dass eine annähernd vollständige Bewertung der Baumarten in einem Untersuchungsgebiet unwahrscheinlich ist. Sollte die Baumliste erweitert werden, würde sich die praktische Anwendbarkeit des methodischen Ansatzes erhöhen. BUTH et al. (2015) verknüpfen für ihre deutschlandweite Studie die effektive Wasserbilanz in der Vegetationsperiode als Klimasignal mit Bodeneigenschaften und Baumart als Sensitivität. Im Ergebnis liefern sie für die Baumarten Fichte, Kiefer und Buche Karten zur Beurteilung der Nutzfunktion der Holzproduktion für die Klimaperioden 1961-1990 und 2020-2050. Mit der *Klima-Arten-Matrix für Waldbaumarten (KLAM-Wald)* stellen ROLOFF & GRUNDMANN (2008) einen weiteren Ansatz vor. Sie liefert eine Einschätzung für 47 Waldbaumarten zur Verwendung unter Bedingungen des Klimawandels. Dabei liegt das Augenmerk auf der Trockenstresstoleranz und der Frostresistenz. Eine vierstufige Benotung erfolgt für jede Baumart für vier Standortbereiche unterschiedlicher Wasserversorgung. Das Bewertungssystem wurde mit *KLAM-Stadt* ebenfalls für Stadtbäume (ROLOFF et al. 2009) sowie mit *KLAM-Landschaft* für die freie Landschaft (ROLOFF & MEYER 2008) umgesetzt. *KLAM-Wald* berücksichtigt kein explizites klimatisches Signal. Das Ergebnis des Ansatzes bildet somit nur die Sensitivität als Verknüpfung von Baumart und Standorteigenschaften ab.

Aufgrund der hohen Zahl der berücksichtigten Baumarten, der zusätzlich integrierten Bewertung der Frostresistenz und der einfachen Anwendung durch ein Notensystem ist *KLAM-Wald* zur Beurteilung des Trockenstress auf Waldflächen für den angedachten Anwenderkreis geeignet. Die Methodik sollte jedoch um ein Klimasignal erweitert werden, um klimatische Veränderungen berücksichtigen zu können.

### ***Trockenstress für Stadtbäume***

Stadtbäume erfahren aufgrund ihres anthropogen geprägten Umfeldes die stärkste Beeinflussung durch Hitze- und Trockenstress und werden vergleichsweise stärker als Bäume auf naturnahen Standorten von den klimatischen Veränderungen betroffen sein (vgl. Kapitel 2.5.1, 2.5.2). Trotzdem erhalten sie bisher wenig Aufmerksamkeit, wenn es darum geht, die Auswirkungen des Klimawandels auf sie abzuschätzen. Entsprechend existieren nur wenige praxisrelevante methodische Ansätze für die untersuchte Zielstellung. Vorhandene Ansätze im wissenschaftlichen Kontext versuchen den Trockenstress bei Stadtbäumen und -grün mittels Klimahüllen (YANG 2009), Wasserpotenzial des Blattes am Welkepunkt (SJÖMAN et al. 2015), Jahresringanalyse (GILLNER et al. 2014) oder Chlorophyll-Fluoreszenz (SWOCZYNA et al. 2015, OW et al. 2011) zu bestimmen. Auch Multikriterienanalysen werden eingesetzt, um Baumarten für den urbanen Einsatz zu priorisieren (VLACHOKOSTAS et al. 2014). Auf der Praxisseite existieren diverse Leitfäden für die urbane Baumartenwahl (BASSUK et al. 2009, MENKE et al. 2014, HUGHES et al. 2015) sowie Online-Datenbanken (*SelecTree*: UFEI 2016, *CiTree*: TUD-FB 2016, *GALK-Straßenbaumliste*: GALK-AKSB 2016), in denen mittels Baum- und Standorteigenschaften nach trockentoleranten Baumarten gesucht werden kann. Derartige Ansätze sind für die Anwendung als Bewertungsinstrument auf kommunaler Ebene jedoch wenig geeignet. Zu einem ähnlichen Schluss kommt die Metastudie von SJÖMAN & NIELSEN (2010), die dendrologische Literatur, wissenschaftliche Artikel, städtische Planungsleitfäden und Baumschulkataloge auf ihre praktische Anwendbarkeit im städtischen Kontext auswertet. Ihr Ergebnis zeigt, „*that existing information is piecemeal and that most is either too general (dendrology literature) or too specific or contradictory (scientific literature) to meet the requirements of urban tree planners, while books intended for plant use in cities do not sufficiently integrate the local perspective*” (SJÖMAN & NIELSEN 2010: 281).

Als guter Kompromiss zwischen wissenschaftlicher Basis, praktischer Anwendbarkeit und Bewertungscharakteristik stellt sich die *Klima-Arten-Matrix für Stadtb Baumarten (KLAM-Stadt)* nach ROLOFF et al. (2008, 2009) dar. Sie beinhaltet Bewertungen für über 250 einhei-

misches sowie neu- und nichtheimische Gehölzarten hinsichtlich ihrer Eignung für den urbanen Raum unter dem Aspekt des Klimawandels. *KLAM-Stadt* berücksichtigt Trockenstresstoleranz und Winterhärte in jeweils vier Stufen, wobei die Gehölzarten nach abnehmender Eignung in einer Matrix eingeordnet werden. Abbildung 11 zeigt die *KLAM-Stadt* und ihre Bewertungsstufen. Angewandt wird die Methodik bereits in mehreren deutschen Städten: Dresden (RKK 2013), Düsseldorf (RENDENBACH et al. 2014) und Jena (KNOPF 2016, KNOPF et al. 2016). Als Kritik am Ansatz kann geltend gemacht werden, dass *KLAM-Stadt* weitere Standortfaktoren wie Bodeneigenschaften, Verkehrsemissionen, Streusalzbelastung oder benötigter Wurzelraum nicht berücksichtigt. Diese Faktoren können kleinräumig sehr dominierend sein und müssen bei der Umsetzung vor Ort mit einbezogen werden. Auch integriert *KLAM-Stadt*, ebenso wie *KLAM-Wald*, kein Klimasignal in die Bewertung, so dass klimatische Veränderungen nicht einbezogen werden können.

		Winterhärte			
		.1	.2	.3	.4
Trockenstresstoleranz	1.	1.1	1.2	1.3	1.4
	2.	2.1	2.2	2.3	2.4
	3.	3.1	3.2	3.3	3.4
	4.	4.1	4.2	4.3	4.4

**Abbildung 11: Klima-Arten-Matrix für Stadtbaumarten. Abgestufte Bewertung der Arten nach Trockenstresstoleranz und Winterhärte: grün = sehr gut geeignet, grün-gelb = gut geeignet, gelb = geeignet, aber zum Teil problematisch, rot = nur sehr eingeschränkt geeignet, violett = ungeeignet (ROLOFF et al. 2008:35)**

Von den vorgestellten methodischen Ansätzen eignet sich *KLAM-Stadt* am ehesten für die praxisnahe Bewertung des Trockenstresses für Stadtbäume. Auch das schlüssige Gesamtkonzept mit *KLAM-Wald* und *KLAM-Landschaft* sowie die bestehende Akzeptanz seitens der Zielgruppe sprechen für diesen methodischen Ansatz. Verbesserungswürdig bleibt jedoch die fehlende Einbindung der konkreten klimatischen und standörtlichen Verhältnisse vor Ort.

## 2.6 Überschwemmungen durch Starkregen

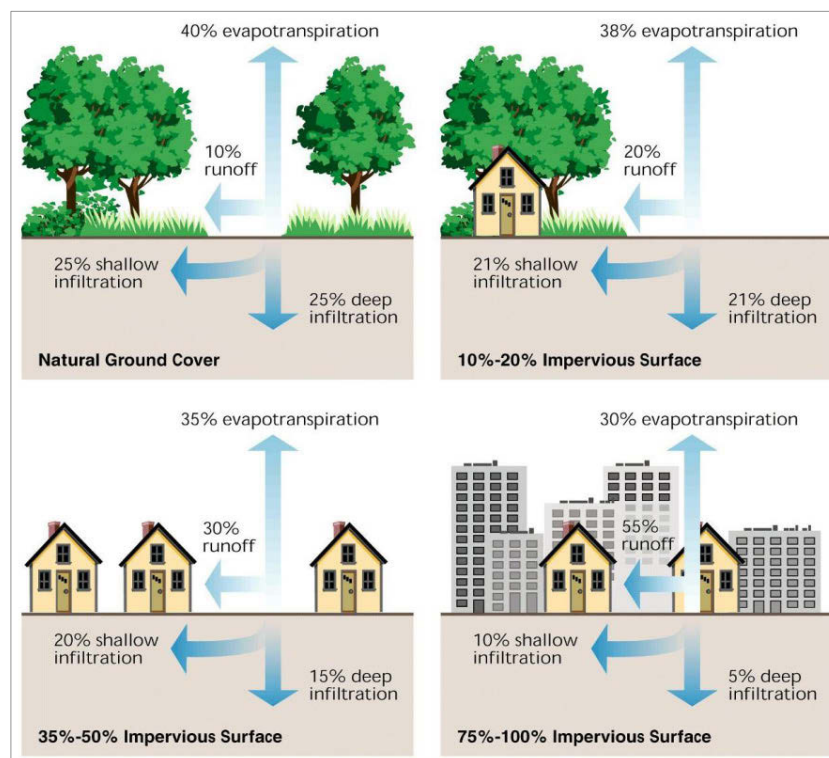
### 2.6.1 Auswirkungen von Überschwemmungen

Eine Überschwemmung bezeichnet ein Überfließen oder Eindringen einer großen Wassermenge über bzw. in Bereiche, die normalerweise nicht wasserbedeckt sind. Sie können u. a.

durch Flusshochwasser, Meeresspiegeländerungen oder starke Regenfälle hervorgerufen werden und nach der Geschwindigkeit ihres Einsetzens unterschieden werden, z. B. in sehr schnelle Sturzfluten oder langsam einsetzende Überschwemmungen infolge eines Meeresspiegelanstiegs (JHA et al. 2012). Der Fokus dieses Kapitels liegt auf Regenüberschwemmungen (*pluvial floods*) und Sturzfluten (*flash floods*) infolge von Starkregen. Wie Abbildung 12 (S. 42) illustriert, sind offene Bodenflächen zur Versickerung des Regenwassers in urbanen Räumen mit hohem Versiegelungsgrad nur begrenzt vorhanden, so dass ein Großteil über die Kanalisation abgeführt werden muss. Übersteigt die Menge des Regenwassers die Infiltrationskapazität des Bodens und die Aufnahmekapazität der Kanalisation, z. B. durch Niederschlagsereignisse mit hoher Intensität bzw. Dauer, kommt es zu oberflächlichem Abfluss über Straßen und Bordsteine. Bei entsprechendem Gefälle, kann der Abfluss sehr schnell erfolgen, so dass sich im Extremfall Sturzfluten entwickeln (WMO 2008, JHA et al. 2012). Von Sturzfluten spricht man laut CASTRO et al. (2008a: 1), „wenn innerhalb von Minuten bis wenigen Stunden nach einem starken Regenereignis [...] plötzlich große Wassermassen ein Gebiet überfluten.“ Starkniederschläge, die Sturzfluten begünstigen, stehen oft in Verbindung mit kleinräumigen, konvektiven Regen- bzw. Gewitterereignissen, die vor allem im Sommer auftreten (CASTRO et al. 2008a, BRENDDEL et al. 2014). Die Dauer von Sturzfluten ist im Vergleich zu Überschwemmungen durch Flüsse sehr kurz und beträgt nur wenige Stunden. Trotzdem verfügen sie infolge hoher Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen sowie erheblicher Feststofftransporte über ein hohes Zerstörungspotenzial.

Die Auswirkungen von Überschwemmungen sind vielfältig, sowie direkter und indirekter Art. Sie lassen sich für Städte in gesundheitliche und wirtschaftliche Schäden unterteilen (WMO 2008). Die wichtigste, direkte Auswirkung betrifft die Gesundheit der Menschen. Laut *International Disaster Database* waren in der Dekade 2006-2015 pro Jahr durchschnittlich mehr als 80 Mio. Menschen von Überschwemmungen betroffen, rund 5.700 Menschen starben im Mittel jedes Jahr (GUHA-SAPIR et al. 2009). Für Sturzfluten werden im Zeitraum 1900 bis 2015 573 Ereignisse mit mehr als 65 Tsd. Toten und fast 60 Mrd. US-Dollar Schaden aufgeführt. Auf Europa entfallen davon 70 Ereignisse mit 1.877 Toten und rund 19 Mrd. US-Dollar Schaden. Die Mehrzahl der Opfer bei Überschwemmungen stirbt durch Ertrinken, ein kleinerer Teil durch tödliche Verletzungen, Herzinfarkt, Stromschlag, Kohlenmonoxid-Vergiftung oder Brand (JONKMAN & KELMAN 2005, ALDERMAN et al. 2012, WAROUX 2011). In sogenannten Entwicklungsländern stirbt ein Großteil der Opfer infolge von Durchfall und anderer, durch verunreinigtes (Trink-)Wasser übertragener Krankheiten (KUNII et al. 2002, AHERN et

al. 2005). Nichttödliche körperliche Verletzungen durch Überschwemmungen umfassen Verstauchungen, Schnitt- und Platzwunden, Quetschungen und Schürfwunden (DU et al. 2010). Zu den psychischen Verletzungen zählen u. a. Ängste, Depressionen, posttraumatische Belastungsstörungen und Suizide infolge des Verlusts von Angehörigen und Eigentum sowie Obdachlosigkeit (PETERSEN 2001, FEW & MATTHIES 2006). Auch bei Überschwemmungen können Effekte sozialer Vulnerabilität beobachtet werden: ältere Menschen und Kinder sterben häufiger durch Ertrinken als andere Bevölkerungsteile (BARTLETT 2008, JHA et al. 2012).



**Abbildung 12: Einfluss der Urbanisierung auf verschiedene Komponenten des Wasserkreislaufes. Eine zunehmende Bodenversiegelung erhöht den Oberflächenabfluss (WMO 2008:5)**

Wirtschaftliche Schäden, wie Sachschäden an Gebäuden und deren Inhalten sowie an Infrastrukturen, sind die zweite große Schadensgruppe. Die Art und die Schnelligkeit des Eintretens der Überschwemmung bestimmen das Ausmaß der Schäden. Infolge der höheren Frequenz von Sturzfluten im Vergleich zu großen Flussüberschwemmungen lag, laut Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (MRE 1999) die durchschnittliche jährliche Gesamtschadenssumme beider Überschwemmungsarten im Zeitraum 1970-1998 in etwa derselben Höhe. Schnelle Abflüsse mit Treibgut, wie Ästen, Bäumen, Möbeln oder Autos, sind sehr energiereich und können Häuser mit sich reißen. Auch Schäden durch Feuchtigkeit in den Baumaterialien oder Unterspülungen können aufwendige Sanierungen oder gar die Aufgabe der Gebäude notwendig machen (JHA et al. 2012). Direkte Schäden an Gebäuden und Produktionsmitteln von Unternehmen ziehen indirekte Folgen nach sich: Produktionsausfälle,

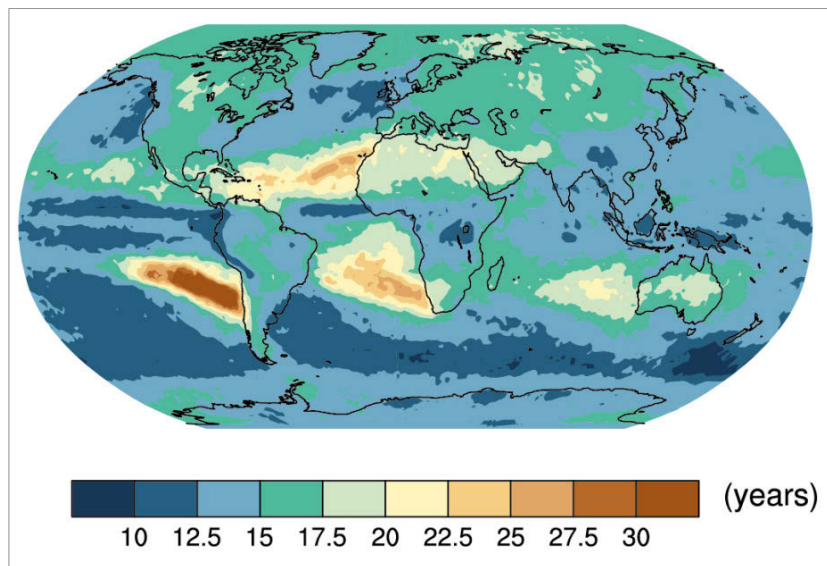


weniger Kundschaft und Verkäufe, Geschäftsaufgabe (LAMOND et al. 2012). Schäden an Infrastrukturen wie Krankenhäuser, Kraftwerke, Straßen, Verwaltungen etc. können schwerwiegende Folgen haben: Zusammenbruch der medizinischen Versorgung, Stromausfälle, Versorgungsengpässe oder Unruhen aufgrund nicht funktionierender Behörden (PETERSEN 2001, JHA et al. 2012).

### **2.6.2 Verstärkung durch den Klimawandel**

Da Überschwemmungen abseits von Flüssen meist durch intensive Regenereignisse ausgelöst werden, wird hier das Auftreten und die Veränderung der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlagsereignissen betrachtet. Es ist wahrscheinlich, dass der Mensch durch seinen Ausstoß von Treibhausgasen zu einer Intensivierung von Starkniederschlägen beigetragen hat, sowohl über den Landmassen der nördlichen Hemisphäre (MIN et al. 2011), als auch auf globaler Ebene (IPCC 2012, 2014a). Die beobachteten Veränderungen sind konsistent mit einem wärmeren Klima und den steigenden Mengen an Wasserdampf in der Atmosphäre, wobei der anthropogene Einfluss auf den atmosphärischen Feuchtegehalt bereits nachweisbar ist (SANTER et al. 2007, WILLETT et al. 2007). Laut IPCC (2012, 2014a) hat seit den 1950er Jahren die Zahl der Starkniederschlagsereignisse über dem Land in mehr Regionen zu- als abgenommen. Gleichzeitig gibt es starke regionale und saisonale Unterschiede in den Trends. Für Europa wurde für den Winter eine Zunahme der Starkniederschlagsereignisse beobachtet, besonders für West- und Zentraleuropa sowie den europäischen Teil Russlands. Für Südeuropa und den mediterranen Raum sowie allgemein den Sommer in Europa sind die Trends insignifikant bzw. inkonsistent (Global inkl. Europa: KIKTEV et al. 2003, ALEXANDER et al. 2006, LEHMANN et al. 2015; Europa: KLEIN TANK & KÖNNEN 2003, ZOLINA et al. 2009; West- und Zentraleuropa: MOBERG & JONES 2005; Deutschland: ZOLINA et al. 2008, TOMASSINI & JACOB 2009, ŁUPIKASZA et al. 2011, SCHÖNTHALER et al. 2015; Großbritannien: RODDA et al. 2009; Portugal: DURÃO et al. 2010; Schweiz: SCHMIDLI & FREI 2005; Tschechien: KYSELÝ 2009; Ungarn: BARTHOLY & PONGRÁCZ 2007). Auch hat sich die Dauer von Regenperioden in Europa in den letzten 60 Jahren um etwa 15-20 % verlängert (ZOLINA et al. 2010). Mit Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen verändern sich die Wiederkehrintervalle. So fanden VAN DEN BESSELAAR & KLEIN TANK (2012) eine Reduzierung der Wiederkehrzeiten der 5- bis 20jährigen Ereignisse in Europa um durchschnittlich 21 % zwischen 1951 und 2010 heraus.

Es ist wahrscheinlich, dass sich mit einem wärmeren Klima Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen in den meisten Regionen der Erde bis Ende des 21. Jahrhunderts verstärken werden, besonders in den hohen und mittleren Breiten sowie den feuchten Tropen (IPCC 2012, 2014a). Dabei wird auf lokaler Ebene mit einer Zunahme der Niederschlagshöhe von 5-10 % pro ein Grad Celsius Erwärmung auf der täglichen und subtäglichen Zeitskala gerechnet. Im Ergebnis könnte sich die Wiederkehrzeit eines heute 20jährigen Ereignisses (1986-2005) am Ende des 21. Jahrhunderts (2081-2100) auf 14 Jahre (*RCP2.6*), 11 Jahre (*RCP4.5*) bzw. 6 Jahre (*RCP8.5*) reduzieren (KHARIN et al. 2013; Abbildung 13).



**Abbildung 13: Veränderung der Wiederkehrzeit von Starkniederschlägen. Projiziertes künftiges Wiederkehrintervall für ein heute (1986-2005) 20jähriges Ereignis des Tagesniederschlags bei 1 °C Erwärmung für die Periode 2081-2100 und das Szenario RCP4.5 (IPCC 2014a:1086)**

Für Nord- und Zentraleuropa werden Zunahmen von Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen vor allem im Winter als sehr wahrscheinlich angenommen (FREI et al. 2006, BENISTON et al. 2007, KENDON et al. 2008). Für den Sommer wird ebenfalls mit einer Zunahme der Starkniederschläge in Zentraleuropa gerechnet, wobei Trends und Aussagesicherheit schwächer sind (CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2003, FREI et al. 2006, KENDON et al. 2008). Auch ist ein Zuwachs der Niederschlagshöhe eines 20jährigen Ereignisses wahrscheinlich (IPCC 2012). Für Südeuropa und den mediterranen Raum sind die Modellprojektionen weniger aussagekräftig; regionsabhängig kommt es zu Ab- oder Zunahmen im Winter. BOBERG et al. (2009a, 2009b) fanden für ganz Europa eine Zunahme von intensiven Niederschlagsereignissen zwischen den Perioden 1961-1990 und 2071-2100, begleitet von einer Abnahme der Tage mit geringem Niederschlag. Die Zunahme lokaler Starkniederschlagsereignisse dürfte künftig in Europa zu verstärkten Überschwemmungen und vor allem Sturzfluten führen (CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2003, KUNDZEWICZ et al. 2006, EEA 2012).

### 2.6.3 Operationalisierung

Die Ansätze zur Bestimmung von überschwemmungsgefährdeten Flächen im urbanen Raum sind vielfältig und unterschiedlich komplex. Sie können von Ortsbegehungen und der Auswertung von Bestandsunterlagen über vereinfachte GIS-Analysen bis hin zur detaillierten hydraulischen Überflutungsanalyse reichen (Tabelle 4).

**Tabelle 4: Ansätze zur Gefährdungsanalyse von Überschwemmungen im urbanen Raum (SCHEID 2014:17)**

Kriterien	Vereinfachte Gefährdungsabschätzung	Topografische bzw. hydrologische Gefährdungsanalyse	Hydraulische bzw. hydrodynamische Gefährdungsanalyse
Datengrundlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• übliche Bestandsunterlagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• übliche Bestandsunterlagen</li> <li>• topografische Daten (DGM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• detaillierte Bestandsdaten (DGM, Entwässerungssystem etc.)</li> </ul>
Vorgehensweise	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswertung von Bestandsunterlagen</li> <li>• Ortsbegehungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GIS-gestützte Analyse der Geländetopografie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hydraulische Simulation der Abfluss- und Überflutungsvorgänge</li> </ul>
Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erste Gefährdungseinschätzung</li> <li>• Skizze mit Gefährdungsbereichen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fließwege und Geländesenken</li> <li>• vereinfachte Gefahrenkarte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fließtiefen und Oberflächenabflüsse</li> <li>• detaillierter Überflutungsplan</li> </ul>
Aufwand und Schwierigkeitsgrad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geringer Aufwand</li> <li>• In Eigenregie möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringer bis mittlerer Aufwand</li> <li>• setzt GIS-Kenntnisse voraus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hoher Aufwand</li> <li>• erfordert Spezialwissen</li> </ul>

Starkregen und ihre Auswirkungen in Form von lokalen Überschwemmungen und Sturzfluten sind Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte, wie z. B. „URBAS - Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten“ (CASTRO et al. 2008a, 2008b), „Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete“ (MEON et al. 2009) und "Klimaanpassungsstrategien zur Überflutungsvorsorge verschiedener Siedlungstypen als kommunale Gemeinschaftsaufgabe" (BBSR 2015). Weiterführende Informationen enthalten auch die Leitfäden „Starkregen und Sturzfluten in Städten“ (DST 2015) und „Starkregen und urbane Sturzfluten – Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge“ (DWA 2013).

Die Anwendung hydrologischer und hydraulischer Wirkmodelle zur Bestimmung der Überschwemmung aufgrund von Starkregenereignissen folgt oft den gleichen Ansätzen wie die Analyse von Überschwemmungen durch Flusshochwasser und enthält mehrere Teilschritte, die meist computergestützt ablaufen (ZOPPOU 2001, MEON et al. 2009, ZHOU et al. 2012):

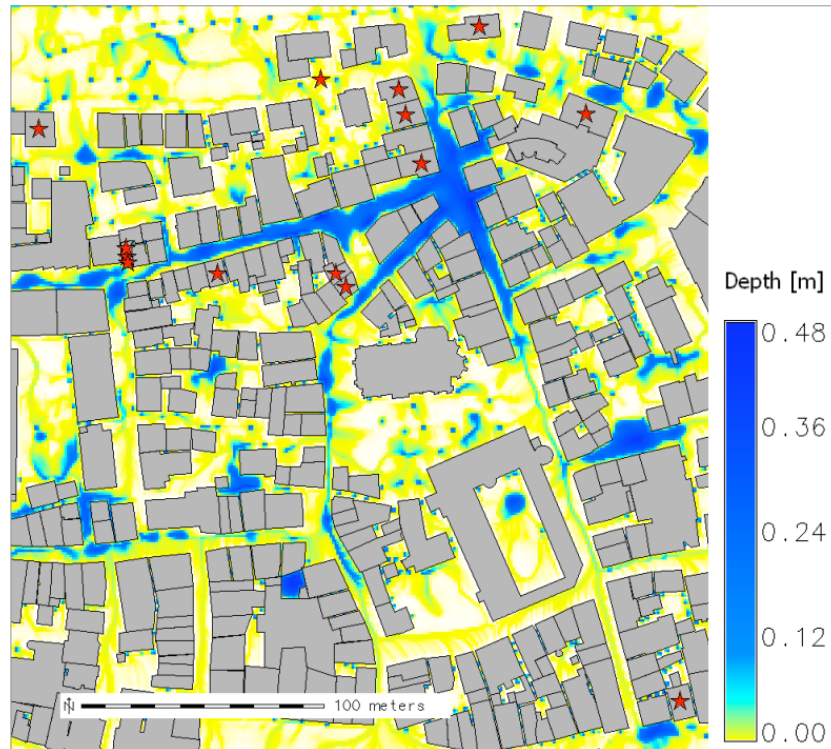
- Belastungsbildung: Bestimmung der Niederschlagshöhe,
- Abflussbildung: Bestimmung des zum Abfluss kommenden Niederschlags,
- Abflussmodellierung: Bestimmung der Ausdehnung, Wassertiefe und Fließgeschwindigkeiten in den überschwemmten Gebieten.

Die Belastungsbildung ist Ursache der Abflussbildung. Die Niederschlagshöhe dafür kann anhand von Schwellwerten, wie z. B. 25 mm/h als Wert für Starkregen (DWD 2016b), statistischen Auswertungen der Lokalität, wie z. B. 95. oder 99. Perzentil der Tagesniederschlagshöhe, regionalen Klimaprojektionen zu künftigen Niederschlagshöhen (WILLEMS et al. 2012, SPEROTTO et al. 2016) oder realen Niederschlagsereignissen, in Form von Regenradardaten oder Messwerten von Niederschlagsstationen, festgelegt werden.

Die Abflussbildung kann auf unterschiedliche Weise ermittelt werden. Ein einfacher empirischer und gebräuchlicher Ansatz ist die Bestimmung mittels *Runoff Curve Number Method* (DVWK 1984, 1991, USDA 1986). Dabei wird über die Infiltrationskapazität verschiedener Bodengruppen und Landnutzungen sowie der Niederschlagsdaten der Abflusskoeffizient berechnet (VOGES 1999, TYRNA & HOCHSCHILD 2010a, 2010b, ALLE et al. 2011). Nach MEON et al. (2009) werden auch physikalisch basierte Ansätze in Form von Infiltrationsgleichungen genutzt.

Für die Abflussmodellierung werden meist hydrologische oder hydraulische (bzw. hydrodynamische) Modelle angewendet (vgl. Tabelle 4, S. 45). Hydrologische Ansätze sind in der Regel einfache, rasterbasierte Analysen, die mittels hydrologischer Funktionen in GIS durchgeführt werden, z. B. in *ArcGIS* (MEON et al. 2009, VISSER 2009, SCHEID et al. 2013) oder *SAGA GIS* (TYRNA 2007, CASTRO et al. 2008b). Hydrologische Modelle sind in ihrer Aussagekraft beschränkt und eignen sich für eine erste Grobanalyse von Fließwegen und stationären Wasserständen in größeren Einzugsgebieten bzw. Stadtgebieten. Als Datengrundlagen dienen ein DGM und Flächennutzungsdaten (LANUV-NRW 2013). Hydrologische Modelle basieren auf dem Prinzip der Kontinuität (Massenerhaltung), während hydraulische Modelle zusätzlich die Impulserhaltung und die Energieerhaltung berücksichtigen. Nach ZOPPOU (2001) sind hydraulische Modelle notwendig, um schnell variierende Abflüsse in komplexem Gelände realitätsnah abzubilden. Hydraulische Modelle sind für Detailanalysen der Überflutungsbereiche und die Maßnahmenplanung geeignet, benötigen aber mehr und genauere Eingangsdaten, sind rechenintensiver und ihr Einsatz daher meist auf kleine Einzugsgebiete bzw. Stadtquartiere beschränkt. Es sind oft Modellsysteme aus einem gekoppelten Kanalnetz- und Oberflächenabflussmodell. Erstere sind meist 1D-Modelle, letztere 2D-Modelle (LANUV-NRW 2013). Beispiele für die Anwendung hydraulischer Modelle, wie *MIKE FLOOD* von DHI, *SOBEK* von Deltares, *HYDRO\_AS-2D* von Hydrotec oder *FloodArea* von geomer, im urbanen Raum liefern u. a. CASTRO et al. (2008b), ASSMANN et al. (2012), FUCHS et al. (2012), ZHOU et al. (2012), SUŠNIK et al. (2014), ROLAND et al. (2015) und YIN et al. (2016).

Zwischen Niederschlag-Abfluss-Modellen zur Abflussbildung und hydraulischen Modellen zum Abflussverlauf gibt es keine scharfe Grenze. Eine Mischform sind Niederschlags-Abfluss-Modelle, die zusätzlich den Oberflächenabfluss zweidimensional mittels reduziertem hydrodynamischen Ansatz abbilden. Nach MEON et al. (2009) zählen hierzu *CASC2D* (JULIEN et al. 1995) und das Modul *r.sim.water* (MITASOVA et al. 2004), das im OpenSource-GIS *GRASS* implementiert ist. *r.sim.water* führt die 2D-Modellierung des Oberflächenabflusses mittels Path-Sampling-Methode durch, wobei ein Partikel, der sich über die Oberfläche bewegt, eine bestimmte Wassermenge repräsentiert. Über die Partikeldichte und -positionen werden Wassertiefen und Abflüsse zu einem Zeitpunkt berechnet (ALLE et al. 2011). Als Eingangsdaten für das Modell werden benötigt: ein hochaufgelöstes DGM, am besten 1 bis 5 m, die Oberflächenrauigkeit in Form von Manning-Werten sowie der effektive Niederschlag, z. B. ermittelt per *curve number*-Methode. Als Ergebnisdaten werden Rasterkarten der Wassertiefe und des Abflusses in frei wählbaren Zeitschritten ausgegeben. Abbildung 14 (S. 48) zeigt eine Karte der Abflusstiefen für die Anwendung des Modells auf die Innenstadt von Tübingen. Die einfache Parametrisierung und prinzipiell gute Eignung von *r.sim.water* zur Modellierung von Überschwemmungen durch Sturzfluten in besiedelten Gebieten (TYRNA & HOCHSCHILD 2010b) sowie die positiven Anwendungserfahrungen (HOFIERKA et al. 2002, CASTRO et al. 2008b, TYRNA & HOCHSCHILD 2010a, 2010b, ALLE et al. 2011, RPD-AAU 2012, HOFIERKA & KNUTOVÁ 2015) machen das Modell zu einem vielversprechenden Ansatz für die Bestimmung der Überschwemmungsflächen nach einem Starkniederschlagsereignis. Einschränkend bleibt zu sagen, dass das Modell bisher nur für kleinere Einzugsgebiete bzw. Stadtteile eingesetzt wurde. Ein Einsatz in größeren Untersuchungsgebieten, wie z. B. Jena mit ca. 115 km<sup>2</sup> Fläche, ist bisher nicht durchgeführt wurden. Generell werden bei den vorgestellten Wirkmodellen keine klimatischen Randbedingungen berücksichtigt. Zwar sind Eingangsdaten zum Niederschlag für die Abflussmodellierung notwendig, diese dienen jedoch der Ableitung und Bewertung der Sensitivität eines Untersuchungsgebietes gegenüber einem einzelnen Niederschlagsereignis, z. B. in Form von Informationen zur überschwemmten Fläche oder maximalen Wassertiefe, und nicht der Beurteilung, wie stark bzw. wie oft ein Klimasignal, z. B. als Anzahl von Extremregentagen pro Jahr als Sturzfluten auslösendes Moment, auf das Untersuchungsgebiet einwirkt. Daher sollte das Ergebnis der Abflussmodellierung zusätzlich mit einem Klimasignal verknüpft werden.



**Abbildung 14:** Starkregenabflussmodellierung mit r.sim.water. Abflusstiefen für ein Niederschlagsereignis von 30 mm/h für das Stadtzentrum Tübingens nach 60 min Simulation unter Verwendung von DGM- und Versiegelungsdaten mit 1 m Auflösung (TYRNA & HOCHSCHILD 2010a:4)

Gelegentlich werden für die Abschätzung lokaler Überschwemmungen durch Starkregen auch Indikatorenansätze genutzt. BUTH et al. (2015) verknüpfen in ihrer deutschlandweiten Studie auf Landkreis-Basis für ihren Indikator Sturzflutpotenzial die Anzahl der Starkregentage, d. h. Tage mit einer Niederschlagssumme ab 20 mm, und das mittlere Oberflächengefälle im Untersuchungsgebiet. Weiterhin nutzen sie den Indikator „Starkregen auf versiegelten Flächen“, basierend auf den genannten Starkregentagen und dem Anteil der versiegelten Fläche, um die Auswirkungen auf das Kanalnetz und Kläranlagen zu beschreiben. FERNÁNDEZ & LUTZ (2010) benutzen einen Indikator aus Geländehöhe, Hangneigung, Grundwasserflurabstand, Entfernung zum Vorfluter und Landnutzung für ihre urbane Überflutungsanalyse. Ähnlich geht ELKHRACHY (2015) vor, der Abflussfaktor, Bodenart, Hangneigung, Oberflächenrauigkeit, Entfernung zum Vorfluter, Vorfluterdicke des Gebietes und Landnutzung zu einem *flood hazard index (FHI)* verbindet. ARMENAKIS & NIRUPAMA (2014) schließlich verknüpfen Bevölkerungsmerkmale (u. a. Alter, Einkommen, Bildungsniveau) mit Reliefinformationen (Hangneigung, Muldendichte) zu einem Überschwemmungsrisikoindex für Toronto, Kanada.

Indikatorenansätze stellen eine einfache Möglichkeit der Beurteilung dar. Sie vernachlässigen jedoch einen wichtigen Faktor, der nur über eine Abflussmodellierung mit hydrologischen bzw. hydraulischen Wirkmodellen integriert werden kann: die Nachbarschaftsbeziehungen

---

zwischen den kleinsten betrachteten Einheiten. Während sich das Wasser bei Wirkmodellen von Zelle zu Zelle bewegen und akkumulieren kann, erfolgt die Betrachtung und Bewertung der räumlichen Einheiten bei Indikatorenansätzen unabhängig von den benachbarten Einheiten; ein Stoff- und Energieaustausch wird somit nicht berücksichtigt. Dieses Vorgehen ist jedoch ungeeignet, wenn dynamische Vorgänge, wie sie Überschwemmungen bzw. Sturzfluten darstellen, annähernd realistisch abgebildet werden sollen. Es wird deutlich, dass Wirkmodelle belastbarere Ergebnisse liefern als Indikatorenansätze, wenn es um Überschwemmungen infolge von Starkregenereignissen geht.

### **3. Untersuchungsgebiet**

#### **3.1 Naturraum, Landnutzung und Demographie**

Die Stadt Jena liegt im Nordosten des Bundeslandes Thüringen, im Mittleren Saaletal. Die Saale hat sich an dieser Stelle etwa 220 m tief und bis zu 2 km breit in die ostthüringische Muschelkalkplatte und das darunterliegende Röt eingeschnitten. Das Saaletal verläuft etwa von SSW nach NNO und ist seitlich durch viele kleine Täler stark gegliedert, wie z. B. das Mühlthal, das Ammerbacher Tal und das Gembdental (KLUGE & MÜLLER-WESTERMEIER 2000). Die Höhenunterschiede betragen bis zu 261 m, mit dem Cospoth (397 m ü.N.N.) als höchstem und der Saaleaue nördlich von Kunitz (136 m ü.N.N.) als niedrigstem Punkt im Stadtgebiet (HOFFMANN et al. 2014).

Das Stadtgebiet hat eine Größe von 114,8 km<sup>2</sup>. Davon entfällt nach TLS (2016) ein Viertel (27,8 km<sup>2</sup>) auf Siedlungs- und Verkehrsflächen. Die Bebauung erstreckt sich beiderseits der Saale entlang der Talsohle, in den Nebentälern und an den Hängen. Große Industrie- und Gewerbegebiete befinden sich hauptsächlich westlich der Saale, u. a. in Jena-Süd, Göschwitz und Maua. Allgemein kann man einen verdichteten, städtisch geprägten Teil Jenas entlang der Talachsen (z. B. Ortsteile Nord, Süd, West) und einen eher ländlich geprägten, peripheren Teil (z. B. Ortsteile Kunitz, Leutra, Vierzehnheiligen) unterscheiden. Das Stadtgebiet ist zu etwa einem Drittel mit Wald (37,1 km<sup>2</sup>) bestanden. Die größten Waldareale finden sich auf den Hochflächen, u. a. der Jenaer Forst, die Kernberge und das Hufeisen. Der Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen beträgt ca. 40 % (45,5 km<sup>2</sup>). Diese finden sich vor allem im Nordwesten und (Nord-) Osten der Stadt, z. B. in den Ortsteilen Lützeroda, Cospeda, Kunitz und Wogau. Mit 1,16 km<sup>2</sup> haben Wasserflächen nur einen marginalen Anteil am Stadtgebiet, die meist innerhalb der Auenbereiche der Saale liegen. Abbildung 15 (S. 51) zeigt das Stadtgebiet Jenas und die Verteilung der Landnutzungen. Die Nord-Süd-Erstreckung beträgt ca. 15 km, die Ost-West-Ausdehnung rund 12 km (HOFFMANN et al. 2014). Wichtige Verkehrsachsen sind die Bundesautobahnen 4 und 9 im Süden der Stadt und östlich der Stadtgrenze, die Bundesstraßen 7 und 88 in West-Ost- bzw. Nord-Süd-Richtung sowie parallel verlaufende Bahntrassen.

Die Stadt Jena gliedert sich in 30 Ortsteile und 41 statistische Bezirke; letztere bilden die Basis für die räumlich differenzierte Analyse der Klimawirkungen. Zum Stand 31.12.2015 belief sich die wohnberechtigte Bevölkerung auf 113.690 Personen, wovon 107.048 Personen mit



Hauptwohnsitz und 6.642 Personen mit Nebenwohnsitz in Jena gemeldet waren. Von den Einwohnern Jenas mit Hauptwohnsitz entfielen 6,0 % auf die Altersgruppe der Unter-6-Jährigen, 73,0 % auf die 6-bis-unter-65-Jährigen und 21,0 % auf Personen ab 65 Jahre (STJE 2016c). Aufgrund des Wirtschafts- und Universitätsstandortes Jena wächst die Stadt in den letzten Jahren leicht, was bis 2030 anhalten soll (TLS 2014).

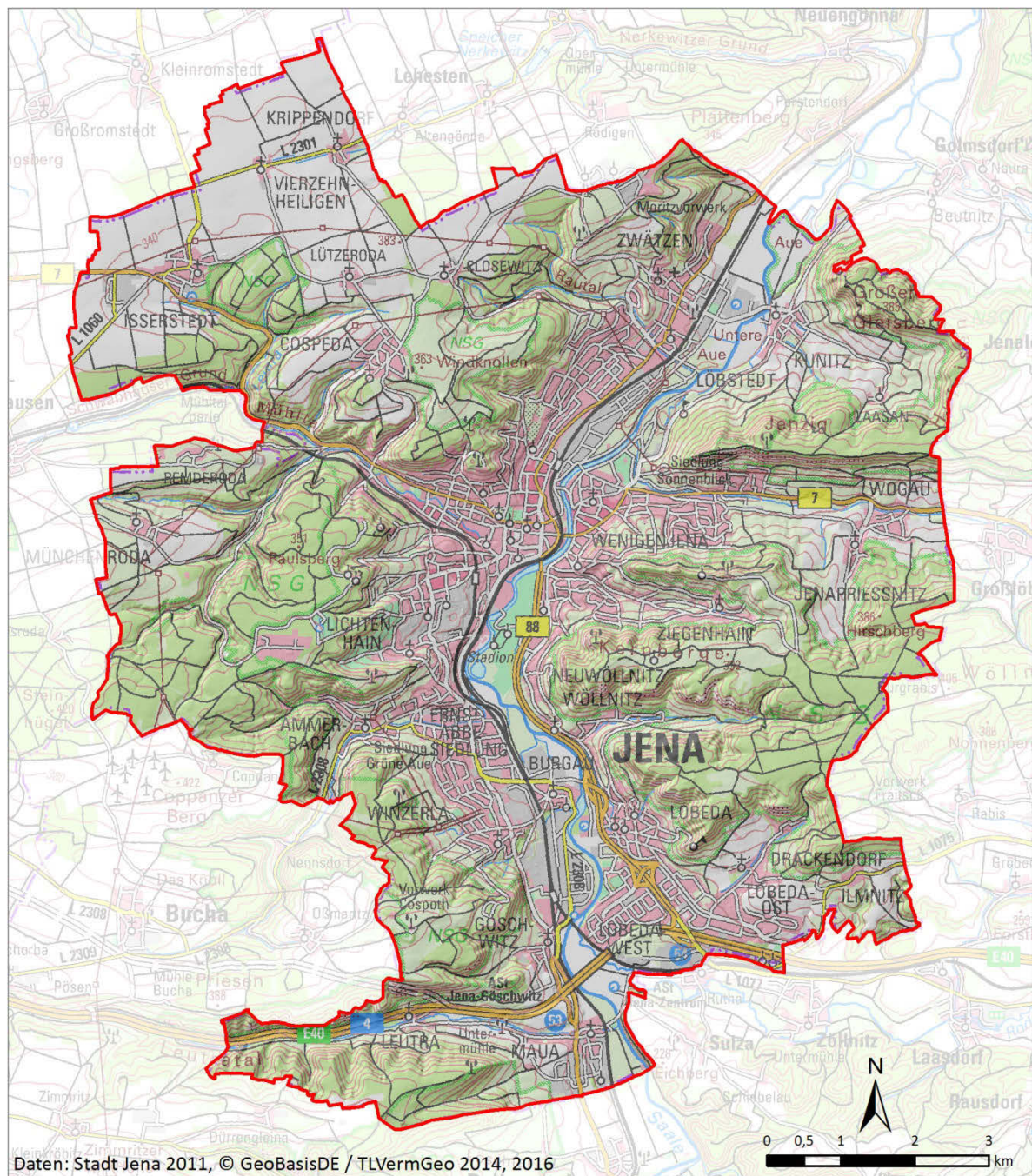


Abbildung 15: Untersuchungsgebiet Stadt Jena (eigene Darstellung)

### 3.2 Lokalklima

Jena besitzt mit den Aufzeichnungen der meteorologischen Station im Schillergäßchen eine der längsten klimatologischen Messreihen Deutschlands (KLUGE & MÜLLER-WESTERMEIER 2000). Seit 1821 sind hier Daten vorhanden; Klimaaufzeichnungen werden aber bereits seit 1770 betrieben. Heute gehört sie als Jena-Sternwarte zum Stationsnetz des DWD. Großraumklimatisch gehört die Stadt zum warmgemäßigten, ständig feuchten Mittelbreitenklima, regionalklimatisch zum mitteldeutschen Berg- und Hügellandklima, besitzt aber aufgrund seiner geschützten Tallage eine Sonderstellung (BÖER & SCHMIDT 1976, KOTTEK et al. 2006). In HOFFMANN et al. (2014) wird die klimatische Charakteristik Jenas für die Klimaperiode 1980-2010 wie folgt beschrieben: Die mittlere jährliche Lufttemperatur liegt bei 9,9 °C, wobei der kälteste Monat der Januar mit 1,3 °C im Tagesmittel ist, der wärmste Monat der Juli mit 19,2 °C. Im Mittel weist Jena 53 Sommertage (vgl. Tabelle 5) und 13 heiße Tage pro Jahr auf. Die mittlere Anzahl der Frosttage liegt bei 73, die der Eistage bei 17. Die mittlere Jahressumme des Niederschlags beträgt 610 mm, wobei Mai bis August die regenreichsten Monate sind mit einem Maximum im Juli (73 mm). Die geringsten Niederschläge fallen im Januar und Februar (35 bzw. 34 mm). Die mittlere Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von mindestens 1 cm beträgt 35. Der Mittelwert für die Luftfeuchte beläuft sich auf ca. 73 %; an rund 72 Tagen pro Jahr herrscht zeitweise Nebel. Die mittlere jährliche Sonnenscheindauer beträgt ca. 1.500 Stunden. In Thüringen herrschen im Mittel westliche bis südwestliche Windrichtungen vor mit einem zweiten Maximum in den östlichen bis nordöstlichen Sektoren. Das nord-südverlaufende Saaletal modifiziert die Hauptwindrichtung und verleiht ihr eine stärkere südliche Komponente. Die mittlere Windgeschwindigkeit 10 m über Grund beträgt 1,5 bis 3,0 m/s. Geringere mittlere Windgeschwindigkeiten von unter 2 m/s treten in den stark bebauten Tallagen auf, während höhere Windgeschwindigkeiten auf den Plateauflächen um Jena erreicht werden. Nach DÖRFER (2004) sind die für Jena im Zeitraum 1881-1997 vorherrschenden Großwettertypen: West (27 % Häufigkeit), Hoch Mitteleuropa (16 %) und Nord (16 %).

**Tabelle 5: Übersicht über die verwendeten klimatologischen Kenntage (DWD 2016b)**

<b>Kenntag</b>	<b>Definition</b>
Sommertag	Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur $\geq 25$ °C beträgt
Heißer Tag	Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur $\geq 30$ °C beträgt
Frosttag	Tag, an dem das Minimum der Lufttemperatur $< 0$ °C beträgt
Eistag	Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur $< 0$ °C beträgt

Für Jena kann eine städtische Wärmeinsel nachgewiesen werden. 1953 legt KOCH mit der „Wetterheimatkunde von Thüringen“ ausführliche stadtklimatische Ergebnisse für Jena vor und spricht von der Wärmeinsel der Stadt als einem von vier Kleinklimagebieten Jenas, die

aufgrund der dichten Bebauung im Stadttinnern „einen Überschuß bis zu 3° erreicht“ (KOCH 1953: 26). Innerhalb des *JenKAS*-Projektes unternahm der DWD 2011 Auswertungen der Stationsdaten Jena-Sternwarte, eine halbjährige Messkampagne sowie Modellierungen zu Kaltluft und thermischer Belastung (HOFFMANN et al. 2014). Bei der Messkampagne von Mai bis September 2011 wurde auch die Wärmeinsel Jenas untersucht. Dabei ergab sich, dass die Innenstadt mit der Station Jena-Sternwarte im Zeitraum der Messkampagne im Mittel um ca. 1,3 Kelvin wärmer war als das unbebaute, höhengleiche Umland an der temporären Messstation Gembdental (HOFFMANN et al. 2014). Die Abweichungen zwischen Innenstadt und Umland veranschaulicht auch Tabelle 6 anhand verschiedener Ereignistage. DÖRFER (2004) arbeitete während seiner stadtklimatischen Untersuchungen 2002-2003 eine Wärmeinselintensität von im Mittel etwa 1 K für den Messzeitraum heraus, die Maximalwerte von 4,6 bis 4,8 K zwischen der Station Jena-Sternwarte und Umlandstationen annehmen kann. HOFFMANN et al. (2014) ermittelten sogar maximale Ausprägungen von etwa 4 bis 7 K zwischen Innenstadt (Sternwarte) und Umland (Gembdental) während der frühen Morgenstunden.

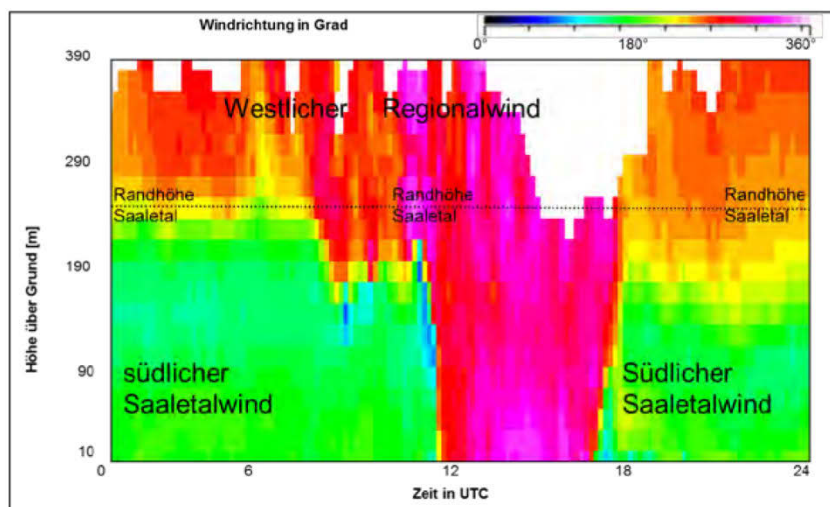
**Tabelle 6: Klimatische Abweichungen zwischen Jenaer Innenstadt und Umland. Zahl der Ereignistage an den Jenaer Messstationen für den Zeitraum vom 01.05. bis 30.09.2011, Basis: 10-Minuten-Mittel (verändert nach HOFFMANN et al. 2014:44)**

Station	Sommertage	Heiße Tage	Frosttage
Sternwarte (Innenstadt)	62	15	0
Gembdental (höhengleiches, unbebautes Umland in Seitental)	52	6	5
Griesberg (höher liegendes, unbebautes Umland in Gipfellation)	37	3	0

Ein autochthones Lokalklima entwickelt sich bei windschwachen, wolkenarmen Wetterlagen mit intensiver kurzweiliger Einstrahlung am Tage und ungehinderter langweiliger Ausstrahlung in der Nacht. Dies geschah nach HOFFMANN et al. (2014) im Zeitraum 2001-2010 in Jena in etwa 36 bis 45 Nächten pro Jahr, mit Maxima zwischen Mai und September. Aufgrund der unterschiedlichen Erwärmung und Abkühlung der Erdoberfläche entwickeln sich in diesen Nächten thermisch induzierte Zirkulationssysteme (BECK 2007). Bereits WAGNER (1915) weist in seiner Beschreibung der klimatischen Situation Jenas auf Kaltluftflüsse im Mühlthal hin. MROSE (1939) untersuchte die Kaltluftströmung im Mühlthal anhand von Messfahrten. Später beschrieb auch KOCH (1953) die lokalen Windsysteme. Eine erste thüringenweite Kaltluftmodellierung erfolgte im Jahr 2000 (AMB 2000). Die Messkampagne des DWD in Kombination mit der Kaltluftmodellierung ergeben für Jena folgendes Bild (KURMUTZ et al. 2012, HOFFMANN et al. 2014): Die Kaltluftproduktion und Kaltluftflüsse setzen spätestens kurz nach Sonnenuntergang ein. In den Seitentälern strömt die Kaltluft von den Hängen zunächst senkrecht zur Talachse und füllt die Seitentäler langsam auf. Bereits nach kurzer Zeit haben sich in Leutra-, Roda-, Gembden-, Gleis-, Mühl- und Ammerbacher Tal Talabwinde in Richtung des



Saaletals etabliert (Abbildung 17a, S. 55). Während der ersten Nachthälfte bestimmen die Kaltluftflüsse aus den Seitentälern des Saaletals sowie die in der Saaleaue gebildete Kaltluft das Geschehen im Stadtgebiet. Der Kaltluftzufluss führt zur Bildung einer Inversionslage im Saaletal, in Folge derer die Temperaturen auf den umliegenden Hochflächen mehrere Grad Celsius über den Temperaturen im Saaletal liegen können. Ab der Mitte der Strahlungsnacht entwickelt sich ein stabiler von Süden nach Norden ausgerichteter Kaltluftstrom als Talabwind im Saaletal, der das Geschehen gegenüber den Zuflüssen aus den Seitentälern dominiert (Abbildung 17c, S. 55). Dieser Saaletalwind ist autochthon und losgelöst vom regionalen Höhenwind, der in Thüringen typischerweise südwestliche bis westliche Richtungen aufweist. Schon früher beschrieb KOCH (1953) einen Südwind im Saaletal, der während der Nacht- und Morgenstunden auftrat, er war aber noch davon ausgegangen, dass es sich um den Teil eines regionalen Windsystems handelt. Abbildung 16 zeigt jedoch, dass der südliche Saaletalwind das Saaletal dominiert, während auf den umgebenden Hochflächen der westliche Regionalwind vorherrscht. Der Saaletalwind ist entlang der grünen Areale der Saaleaue wahrnehmbar (0,5 bis 1,0 m/s), dringt aber kaum in die bebauten Bereiche der Kernstadt ein. Ein Maximum der Strömungsgeschwindigkeit stellt sich erst über Dachniveau in Höhen von 30 bis 60 m ein (1,0 bis 2,5 m/s). Zum Ende der Strahlungsnacht existiert mit dem Saaletalwind ein deutlich ausgeprägter Kaltluftstrom (Abbildung 17d, S. 55). Einige Kaltluftflüsse aus den Seitentälern sind dann bereits zum Erliegen gekommen, u. a. im Gembden- und Pennickental, während andere Seitentäler, u. a. das Mühl- und Leutrat, die ganze Nacht Kaltluft zuführen. Das Saaletal ist zum Ende der Nacht mit Kaltluft gefüllt, wobei die Randhöhen des Tals nicht erreicht werden.



**Abbildung 16:** Saaletalwind und Regionalwind im Bereich Jena. Sodargramm der Windrichtung an der temporären Messstation Jena-Stadion vom 03.10.2011. Basis 10-Minuten-Mittel des Windvektors für ausgewählte Höhen über Grund in m (HOFFMANN et al. 2014:52)

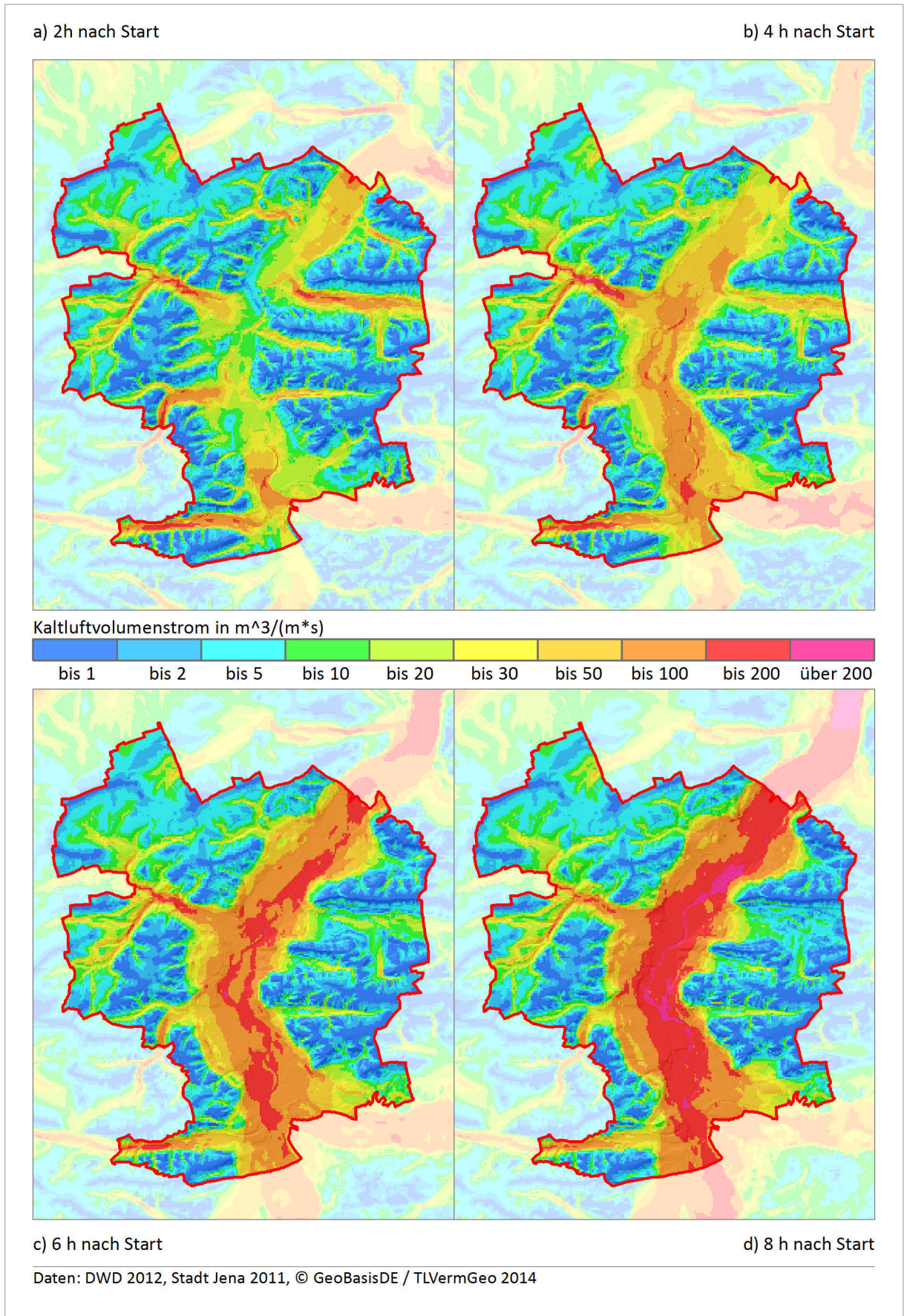


Abbildung 17: Kaltluftsituation während autochthoner Wetterlagen im Stadtgebiet Jena. Simulation mit KLAM\_21 durch den DWD. a)-d) 2h, 4h, 6h, und 8h nach Simulationsbeginn (eigene Darstellung)

## 4. Methoden

### 4.1 Ausgangslage

Aufgrund der negativen Auswirkungen des Stadtklimas auf die Bevölkerung (vgl. Kapitel 2.1.2) sollten stadtklimatische Aspekte in der kommunalen Raumplanung Beachtung finden. Gerade vor dem Hintergrund der klimatischen Veränderungen und der Verstärkung bestehender Problemlagen in den kommunalen Handlungsfeldern (vgl. Kapitel 2.2.2), wird der Schutz der Bevölkerung und der städtischen Infrastrukturen eine größere Rolle spielen. In der Anpassungsstrategie der Bundesregierung wird die Querschnittsaufgabe Raum-, Regional- und Bauleitplanung an den Anfang der Risikovermeidungskette gestellt (RBD 2008). Im Rahmen des Anpassungsprozesses entstanden in den letzten Jahren auf kommunaler Ebene Anpassungsstrategien, die stadtklimatische Aspekte, wie den Wärmeinseleffekt oder lokale Starkniederschläge, unter sich ändernden klimatischen Bedingungen betrachten, u. a. in Berlin, Frankfurt am Main, Bochum, Nürnberg und Jena. Meist wurden diese Projekte durch Messkampagnen oder klimatische Modellierungen begleitet, die ein großes Budget und eine Reihe von Experten involvierten. Dies ist für Städte mit eigenen stadtklimatologischen Arbeitsgruppen oder lokalen Forschungseinrichtungen (Stuttgart, Berlin, Essen, Freiburg im Breisgau) oder innerhalb großer, geförderter Projekte (Hamburg, Nürnberg, Jena) umsetzbar, für die Mehrzahl deutscher Städte sind diese Möglichkeiten aufgrund begrenzter Finanz- und Personalausstattung jedoch nicht gegeben. Um institutionelle und finanzielle Abhängigkeiten zu reduzieren und die lokale Kompetenz zur Klimaanpassung zu stärken, bedarf es Wissen und Methoden, die es kommunalen Fachbehörden erlaubt, belastbare und räumlich differenzierte Aussagen zu den Folgen des Klimawandels zu erarbeiten, die als Basis für kommunale Klimaanpassungsstrategien dienen können.

Als Zielgruppe der zu erarbeitenden Methodik sind Mitarbeiter kommunaler Fachbehörden, z. B. in den Bereichen Umweltschutz und Stadtplanung, sowie weitere städtische Akteure zu sehen, diese haben idealerweise stadtklimatologische oder raumplanerische Grundkenntnisse und Erfahrung im Umgang mit GIS. Aus dem vorgenannten leitet sich der Anspruch der zu verwendenden Methodik ab:

- Erstens sollen die benötigten Eingangsdaten bei den kommunalen Verwaltungen vorliegen, frei über das Internet verfügbar sein oder mit wenig Aufwand bei Bundes-, Landes- oder sonstigen Einrichtungen beschaffbar sein. Verwendete Klimadaten sollten für den Freistaat Thüringen flächendeckend vorhanden sein, besser noch für das Gebiet

der Bundesrepublik, um eine Übertragbarkeit der Methodik auf andere Städte zu ermöglichen. Sind verwendete Datensätze nicht außerhalb Thüringens verfügbar, sollten sie durch ähnliche Datensätze ersetzt werden können.

- Zweitens soll der verwendete methodische Ansatz mit Standard-Software, wie einem GIS und einer Tabellenkalkulation, und mit einem vertretbarem Aufwand durchführbar sein. Auch soll eine Erweiterung durch zusätzliche Klimawirkungen möglich sein.
- Drittens sollen die verwendeten Methoden belastbare Aussagen zu räumlich differenzierten Auswirkungen des Klimawandels für urbane Räume liefern können.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadt Jena werden anhand von drei Klimawirkungen untersucht:

- Wärmebelastung für die Bevölkerung,
- Trockenstress für die Vegetation,
- Überschwemmungen durch Starkregen.

Die Auswahl der Themen ergibt sich aus der Ausstattung des Untersuchungsgebietes und den eingetretenen sowie zu erwartenden Klimaänderungen. Sie stellen die wichtigsten Auswirkungen des Klimawandels auf Jena dar und wurden auch im Zuge der Erstellung der Jenaer Klimaanpassungsstrategie (*JenKAS*) priorisiert (GUDE et al. 2009, KURMUTZ et al. 2012). Die Klimawirkungen wurden im Vergleich zum Projekt *JenKAS* vollständig neu bearbeitet. Dies ergab sich aus dem aktuellen Forschungsstand zur Vulnerabilitätsbewertung (u. a. BUTH et al. 2015) sowie aus dem Anspruch des Ansatzes, die Methodik an allgemein verfügbare Daten anzupassen, um eine größere Übertragbarkeit zu gewährleisten. Gleichzeitig stellen die ausgewählten Klimawirkungen Themen dar, die in vielen mitteleuropäischen Städten relevant sind und sich somit zur Entwicklung und Übertragung einer Analysemethodik eignen.

## 4.2 Konzeptioneller Rahmen

Die Bestimmung der Verwundbarkeit durch die Auswirkungen des Klimawandels folgt der Vulnerabilitätsbewertung des IPCC (*vulnerability assessment*, IPCC 2007), die durch GREIVING et al. (2015) weiterentwickelt wurde. Nach BUTH et al. (2015) dient die Vulnerabilitätsbewertung allgemein als Grundlage für die Ableitung einer Anpassungsstrategie mit dem Ziel der Erhöhung der Resilienz bzw. Anpassungskapazität und ist gut für die Zielstellung dieser Arbeit geeignet.



Laut IPCC (2007) ist die Vulnerabilität (*vulnerability*) eine Funktion der Klimawirkungen (*impacts*) und der Anpassungskapazität (*adaptive capacity*) eines Systems (Abbildung 18). Die Klimawirkung setzt sich zusammen aus der Exposition (*exposure*) des Systems gegenüber Klimaveränderungen und der Sensitivität (*sensitivity*) gegenüber diesen Klimaveränderungen. Dagegen rückt der IPCC (2014b) aktuell von diesem Konzept ab und folgt dem Verständnis von Vulnerabilität, das in der Naturrisikoforschung vorherrscht. Laut BUTH et al. (2015) sind jedoch Vulnerabilitätsbewertung und Risikoabschätzung nicht miteinander vereinbare methodische Ansätze. Aus diesem Grund wird dem ursprünglichen Konzept der Vulnerabilität des IPCC (2007) gefolgt, wie es auch von BUTH et al. (2015) und GREIVING et al. (2015) verwendet wird.

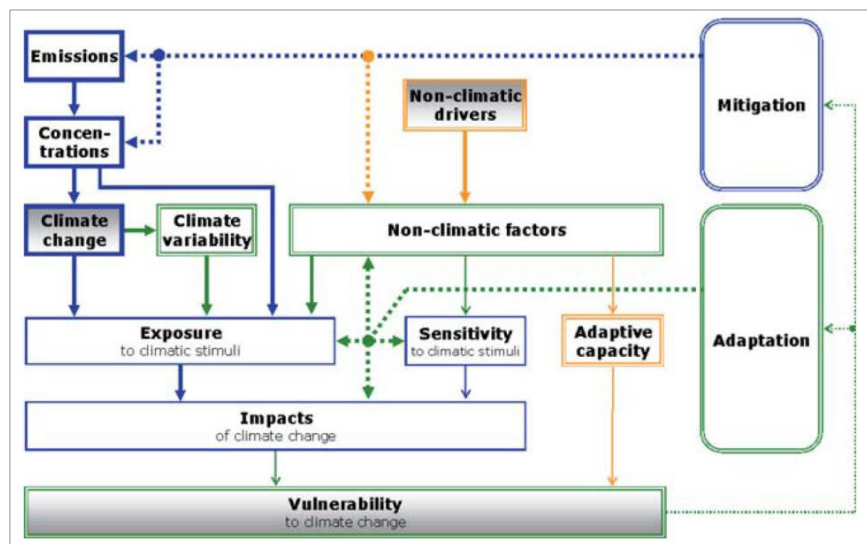
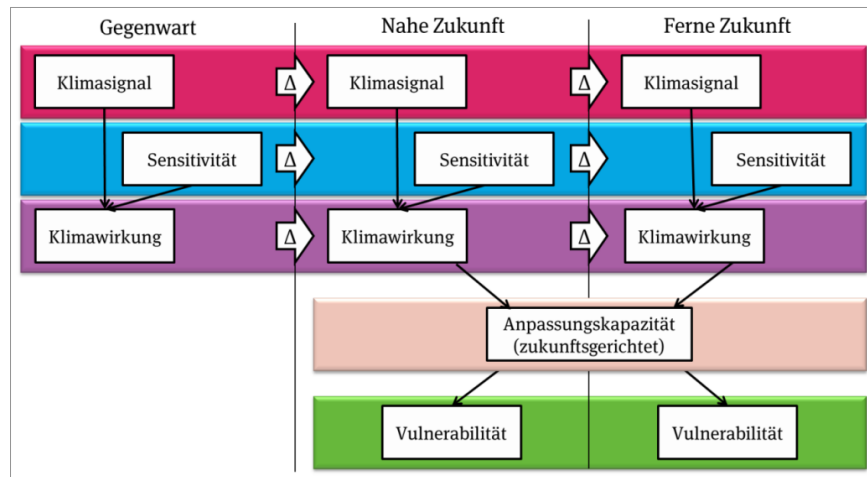


Abbildung 18: Konzept der Vulnerabilitätsbewertung des IPCC (FÜSSEL & KLEIN 2006:319)

Die Vulnerabilitätsbewertung des IPCC (2007) weist verschiedene Schwächen auf, die zu einer Weiterentwicklung führten (BUTH et al. 2015, GREIVING et al. 2015). Während sich das Klimasignal (Exposition) meist auf die Zukunft bezieht, werden andere Elemente des Konzepts, z. B. die Sensitivität und die Anpassungskapazität, in der Regel auf die Gegenwart bezogen und künftige Änderungen beider vernachlässigt. Dies ist ungenügend, da z. B. der demographische Wandel bzw. eine weitere innerstädtische Versiegelung zu einer Erhöhung der Sensitivität gegenüber Hitzeextremen bzw. urbanen Sturzfluten führen wird. Gleichzeitig verweist der Begriff Anpassungskapazität auf Aktivitäten, die in der Zukunft zur Senkung der Vulnerabilität umgesetzt werden können. In vielen Vulnerabilitätsbewertungen wird somit das heutige System einem zukünftig möglichen Klima ausgesetzt (BUTH et al. 2015, GREIVING et al. 2015). Deshalb müssen auch für Sensitivität und Anpassungskapazität Projektionen ähnlich denen des Klimas verwendet werden (BIRKMANN et al. 2013, VAN RUIJVEN et al. 2014).



In der Konsequenz führt diese Forderung zu einer Trennung der Betrachtungshorizonte bei der Bestimmung der Vulnerabilität und somit zu unterschiedlichen Ausprägungen der Vulnerabilität zu verschiedenen Zeitpunkten, wie Abbildung 19 verdeutlicht.



**Abbildung 19: Konzept der Vulnerabilitätsbewertung des Netzwerkes Vulnerabilität (BUTH et al. 2015:39)**

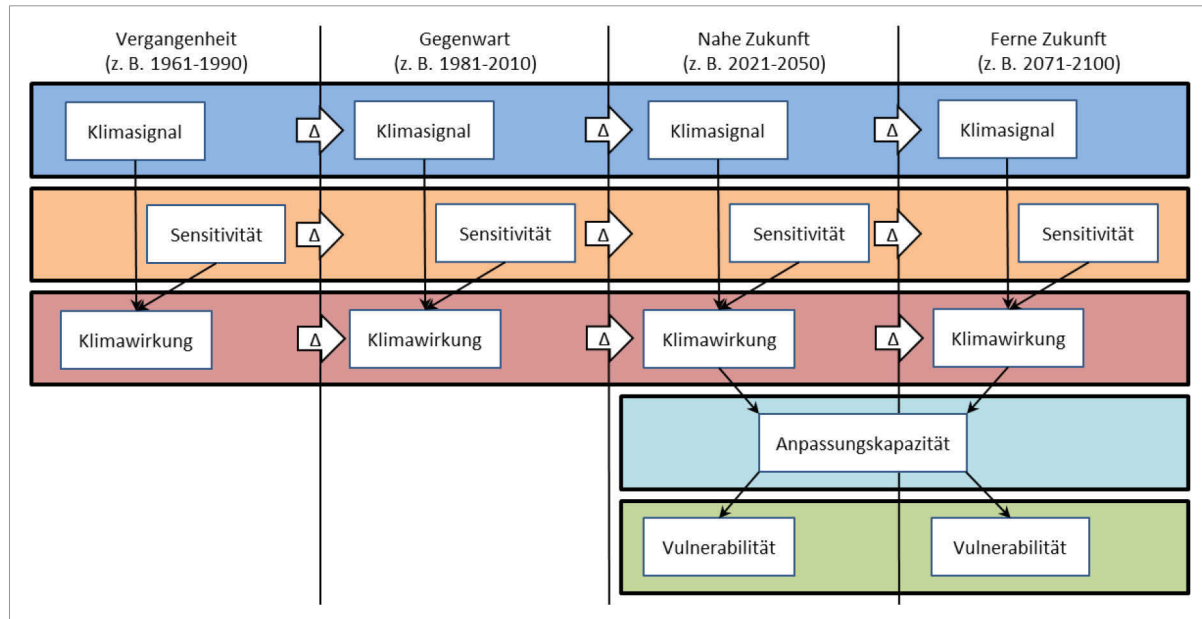
In der Praxis würde dies bedeuten, dass für jede Zeitebene Klimasignal und Sensitivität aus aktuellen bzw. projizierten Daten zur Klimawirkung aggregiert werden. Vulnerabilität und Anpassungskapazität sind zukunftsorientiert, daher werden sie nur für künftige Zeitebenen definiert. Damit existiert keine auf die Gegenwart bezogene Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel, lediglich Klimawirkungen durch das Klima der Gegenwart. Die Anpassungskapazität ist in der Vergangenheit und der Gegenwart ein Teil der Sensitivität, insofern Anpassungsaktivitäten bereits erfolgten. Die Veränderung des Konzepts führt zu den in Tabelle 7 angepassten Definitionen der zentralen Elemente des Vulnerabilitätskonzepts.

**Tabelle 7: Elemente des angepassten Vulnerabilitätskonzepts (verändert nach GREIVING et al. 2015:316)**

Element	Definition
Klimasignal (bzw. <i>exposure</i> oder Exposition)	Das Klimasignal beschreibt die Ausprägung des heutigen Klimas bzw. das einer anderen Zeitebene, wie z. B. nahe oder ferne Zukunft. Die Differenz des Klimasignals zwischen zwei Zeitebenen ist die Klimaveränderung.
Sensitivität (bzw. <i>sensitivity</i> oder Empfindlichkeit)	Die Sensitivität beschreibt, wie stark ein System, wie z. B. Handlungsfeld, Bevölkerungsgruppe oder Stadt, auf das Klimasignal einer Zeitebene reagiert. Die Differenz der Sensitivität zweier Zeitebenen kennzeichnet die Veränderung des Systems.
Klimawirkung (bzw. <i>impact</i> oder Betroffenheit)	Die Klimawirkung beschreibt die Wirkung des Klimas auf ein System zu einem Zeitpunkt. Die Differenz der Klimawirkungen zwischen zwei Zeitebenen charakterisiert die potenzielle Auswirkung des Klimawandels.
Anpassungskapazität (bzw. <i>adaptive capacity</i> )	Die Anpassungskapazität bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, sich an den Klimawandel anzupassen und möglichen Schaden zu mindern. Sie bezieht sich auf die Zukunft bzw. die Möglichkeit künftig Vermeidungs-, Minderungs- oder Schutzmaßnahmen zu ergreifen. In der Vergangenheit ergriffene Anpassungsmaßnahmen sind in der Sensitivität integriert.
Vulnerabilität (bzw. <i>vulnerability</i> oder Verwundbarkeit)	Die Vulnerabilität beschreibt die Anfälligkeit eines Systems gegenüber dem Klimawandel unter Berücksichtigung des Klimasignals, der Sensitivität und der Anpassungskapazität. Sie erlaubt die Ableitung von Anpassungserfordernissen und entsprechenden Entscheidungen. Sie ist das Ergebnis des Vergleichs zwischen Klimawirkungen und Anpassungskapazitäten zu verschiedenen Zeitpunkten.

Der Ansatz von BUTH et al. (2015) und GREIVING et al. (2015) macht auf Schwächen des IPCC-Vulnerabilitätskonzeptes aufmerksam und entwickelt es weiter in Richtung einer konsistenten Analyselogik. BUTH et al. (2015) und GREIVING et al. (2015) verwenden als Klimasignal für die Zeitebene *Reference period* bzw. *Gegenwart* das Klimasignal für die Klima-Referenzperiode 1961-1990 und verknüpfen es mit Daten zur Sensitivität der Gegenwart. Hauptkritikpunkt daran ist, dass sie somit ebenfalls Systemelemente, d. h. Datensätze, mit unterschiedlichen Zeitbezügen vermischen. Denn weder entspricht das Klima der Periode 1961-1990 dem der Gegenwart, die am ehesten durch die Klimaperiode 1981-2010 repräsentiert wird, noch sind die Sensitivitäten der Gegenwart, wie z. B. die Bevölkerungsstruktur oder Landnutzungsverteilung, vergleichbar mit denen in der Referenzperiode 1961-1990. Aus diesem Grund wurde der Ansatz von BUTH et al. (2015) und GREIVING et al. (2015) modifiziert und führt zum konzeptionellem Rahmen, der in Abbildung 20 (S. 61) dargestellt ist. Ziel ist eine konsistente, zeitebenenübergreifende Bewertung, um die Veränderung der Klimawirkung und Vulnerabilität abschätzen zu können, was aber die Kenntnis der minimal und maximal möglichen Klimawirkung bzw. Vulnerabilität über alle betrachteten Zeitebenen voraussetzt, z. B. zwischen 1961-1990 und 2071-2100. Eine solch konsequente Beachtung der Zeitebenen bringt allerdings Probleme in Bezug auf die Datenverfügbarkeit mit sich. Einerseits sind vorhandene Projektionen für Sensitivitätsfaktoren nur auf kurze Zeiträume beschränkt und größtenteils noch unsicherer als Klimaprojektionen (BUTH et al. 2015). Andererseits sind verschiedene Sensitivitätsfaktoren, wie z. B. Bevölkerungszahlen aufgrund wechselnder Raumbezüge infolge der Veränderung von Verwaltungsstrukturen, schwer rekonstruierbar oder vorhersagbar und damit für eine Analyse der Klimawirkung einer Zeitebene selten verfügbar. Dies bedeutet, dass die Klimawirkung nur für die Gegenwart eindeutig bestimmt werden kann und dass sich die Aussageschärfe für die Zeitebenen jenseits der Gegenwart verringert. Somit ist eine Aussage zur Entwicklung der Klimawirkung und Vulnerabilität eines Systems über die Zeit hinweg aufgrund fehlender oder unsicherer Daten schwierig bis nicht möglich.

Fehlende einheitliche Bewertungsvorschriften oder Grenzwerte für die Klimawirkung und die Vulnerabilität, welche z. B. für Ozon und Feinstaub aus dem Umweltbereich bekannt sind, machen eine Einordnung der Ergebnisse schwierig. De facto erfolgt nur eine relative Bewertung eines Teilraums zu allen anderen Teilräumen im Untersuchungsgebiet. Als Teilräume können z. B. Landkreise und kreisfreien Städte verwendet werden (BUTH et al. 2015) oder die Stadtteile einer Stadt in einer kommunalen Anpassungsstrategie.



**Abbildung 20: Modifiziertes Konzept zur Vulnerabilitätsbewertung für die Stadt Jena (verändert nach BUTH et al. 2015:39)**

Der methodische Ansatz für die Stadt Jena folgt den Grundgedanken von BUTH et al. (2015) und GREIVING et al. (2015), erweitert deren Vulnerabilitätsbewertung um eine Zeitebene; er beschränkt sich in der räumlichen Analyse jedoch auf die Gegenwart: Aufgrund der beschriebenen Schwierigkeiten in Bezug auf die Datenverfügbarkeit für künftige Sensitivitäten, des generellen Zukunftsbezugs der Vulnerabilität sowie der Notwendigkeit, einen praxisorientierten Ansatz für die anvisierte Zielgruppe zu erarbeiten, wird in der Arbeit die Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels nicht in Form von Vulnerabilitäten, sondern in Form von Klimawirkungen durchgeführt und nur für die Klimaperiode 1981-2010 für die 41 statistischen Bezirke Jenas räumlich aufgelöst. Die zukünftige Entwicklung der Klimawirkungen anhand der Entwicklung von Klimasignal und Sensitivität kann in diesem Fall nur qualitativ für die Gesamtstadt beschrieben werden und nicht aufgelöst für die städtischen Teilräume. Die Verwendung von Trends für Klimasignal und Sensitivität ermöglicht eine fortlaufende Bewertung im Sinne eines Monitorings, das durch die städtischen Akteure einfach durchgeführt werden kann. Gleichzeitig liefert der relative Bewertungsansatz eine Einordnung der Klimawirkungen für einen städtischen Teilraum im Vergleich zu den restlichen Teilräumen, was eine Prioritätensetzung bei der Planung von Anpassungsmaßnahmen ermöglicht.

### 4.3 Anpassung des Ansatzes für Jena

#### 4.3.1 Klimasignal

Zur Ableitung des Klimasignals werden einerseits die Daten des gemeinsamen *Regionalen Klimainformationssystems (ReKIS)* der Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen genutzt. Hier stehen über das Werkzeug *RaKliDa* (Rasterklimadaten) zahlreiche Klimaelemente wie Lufttemperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit oder potenzielle Verdunstung als flächenhafte Produkte mit 1.000 m Auflösung zur Verfügung. Diese Datensätze wurden auf Basis von Messdaten der Klimastationen des DWD für den Zeitraum 1951-2015 flächenhaft interpoliert und können in Jahres-, Monats- und Tagesauflösung von Behörden, Forschungseinrichtungen, Dienstleistern, Privatpersonen etc. bezogen werden. Gleichzeitig sind die Klimaelemente auch als Projektionen für die Jahre bis 2100 auf Basis regionaler Klimamodelle (*WETTREG 2010*, *STAR2*, *WEREX 5*) verfügbar. Für die Analysen wurden die Tagesraster der interpolierten Klimaelemente für ein Gebiet von 50x50 km um Jena statistisch ausgewertet. Die Daten des *ReKIS* wurden für die Analyse der Klimawirkungen *Wärmebelastung der Bevölkerung* und *Trockenstress für die Vegetation* genutzt. Für die Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* wurden Ergebnisse des Projekts zur „Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotenzials über Thüringen“ (BRENDDEL et al. 2014) mit einer räumlichen Auflösung von 1.000 m verwendet, die von der Thüringer Klimaagentur bereitgestellt wurden (TKA 2015). In Tabelle 14 (Anhang) sind die verwendeten Daten aufgeführt.

#### 4.3.2 Sensitivität

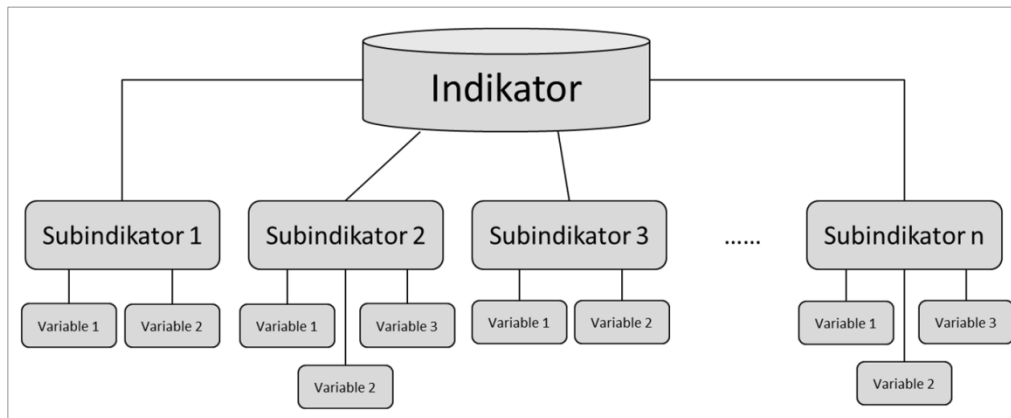
Während Klimadaten oft aus einer oder wenigen Quellen stammen, sind die Daten zur Sensitivität in den Handlungsfeldern zu finden, die analysiert werden sollen. Datenquellen können kommunale Behörden, aber auch Landesämter und -anstalten sein. Hier genutzte Daten umfassen z. B. Bevölkerungsstatistiken, Baumkataster, Landnutzungsinformationen oder Karten zur Bodenversiegelung. Eine Übersicht über die verwendeten Daten und deren Quellen gibt Tabelle 14 (Anhang). Die Daten werden zu Indikatoren weiterverarbeitet oder in eigenständige Wirkmodelle eingespeist. Im Gegensatz zu Klimadaten sind die Sensitivitätsdaten kleinräumiger differenziert. Das Stadtklima wird z. B. durch Landnutzungsänderungen wie Versiegelung oder Begrünung differenzierter beeinflusst als durch den Klimawandel (BMVBS 2011, BUTH et al. 2015). Wichtig für detaillierte Ergebnisse zu den Klimawirkungen sind dementsprechend hochaufgelöste Daten zur Sensitivität.

### 4.3.3 Klimawirkung der Gegenwart

Als kleinste Raumeinheiten zur Bestimmung der Klimawirkungen für Jena werden im Gegensatz zu KURMUTZ et al. (2012) nicht die 30 Ortsteile, sondern die 41 statistischen Bezirke verwendet, um die räumliche Auflösung der Ergebnisse zu erhöhen. Gleichzeitig liegen auf dieser räumlichen Ebene mehr statistische Daten vor als für die Ebene der Ortsteile. Die Bearbeitung auf Ebene der statistischen Bezirke dient der überblicksmäßigen Bewertung hinsichtlich der Klimawirkungen im Stadtgebiet. Zur Ableitung von räumlich differenzierten Planungshinweisen zur Klimaanpassung wird die Ebene der statistischen Bezirke später verlassen und auf der Ebene konkreter Flächen gearbeitet.

Für die Analyse der Klimawirkungen eignen sich zwei methodische Grundansätze: Wirkmodelle und Indikatoren. Wirkmodelle, z. B. Hochwasser- oder Erosionsmodelle, bilden die komplexen und häufig nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Klimasignal und Sensitivität ab und liefern bereits aggregierte Ergebnisdaten (BUTH et al. 2015). Indikatorenansätze werden genutzt, wenn nicht auf Wirkmodelle zurückgegriffen werden kann. Vulnerabilitätsindikatoren eignen sich nach HINKEL (2011) besonders auf der lokalen Ebene zur Identifikation von durch den Klimawandel betroffenen Personengruppen und Handlungsfeldern. Auch werden Vulnerabilitätsindikatoren als das Mittel der Wahl für die Informationsvermittlung zwischen Wissenschaft und Politik gesehen. Bei Indikatorenansätzen werden Indikatoren für das Klimasignal und die Sensitivität zur Klimawirkung aggregiert, wobei sich jeder der Indikatoren wiederum aus mehreren Variablen zusammensetzen kann, so dass das Klimasignal und die Sensitivität auch durch mehrere Eigenschaften beschrieben werden können (SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING 2013, GREIVING et al. 2015). In der Arbeit wurden für die Klimawirkungen *Wärmebelastung der Bevölkerung* und *Trockenstress für die Vegetation* reine Indikatorenansätze verwendet, für die Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* eine Kombination aus Wirkmodell und Indikatorenansatz. Indikatorenansätze sind flexibler, da sie anpassbar an die gewünschte Fragestellung und einfacher zu handhaben sind. Meist reicht die Nutzung eines GIS zur Bearbeitung aus. Zudem sind Wirkmodelle bisher nicht für alle Klimawirkungen vorhanden oder frei verfügbar. Nachteil von Indikatorenansätzen ist der schlechter abgebildete Wirkzusammenhang und die teils reduzierte räumliche Genauigkeit gegenüber Wirkmodellen. Insgesamt jedoch sind Indikatorenansätze für den Anspruch des Ansatzes und die Zielgruppe am besten geeignet. Wirkmodelle können dann für nachfolgende Detailuntersuchungen eingesetzt werden, die nach einer höheren räumlichen Auflösung und einer Abwägungsfestigkeit im Planungsalltag verlangen.

Für die Indikatorbildung wird ein hierarchisches Design genutzt, da es laut TATE (2012) die Verwendung von Subindikatoren und eine einfache modulare Erweiterung ermöglicht (Abbildung 21). Die Erstellung der Indikatoren orientiert sich am „Handbook on constructing composite indicators“ (OECD 2008). Dabei kamen folgende Arbeitsschritte zur Anwendung, die anschließend näher erläutert werden: Variablenauswahl, Ergänzung fehlender Daten, Skalen-Transformation, Normalisierung, Gewichtung und Aggregation.



**Abbildung 21: Struktur eines hierarchischen Vulnerabilitätsindex mit Subindizes (verändert nach TATE 2012:329)**

Die Auswahl geeigneter Variablen orientierte sich am Forschungsstand für jede Klimawirkung und der Verfügbarkeit und Aktualität der Variablen für das Untersuchungsgebiet. Für die Variablen der Sensitivität wurden absolute statt relativer Werte genutzt, da sie der Perspektive einer übergeordneten strategischen Planung durch die kommunale Verwaltung am besten entsprechen (SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING 2013). Auch BUTH et al. (2015) weisen auf das Problem *absolute vs. relative Werte* bei der Erfassung der Sensitivität hin und konstatieren die Legitimität und Bedeutung beider Perspektiven.

Datenlücken traten nur für Bevölkerungsmerkmale aufgrund des Datenschutzes auf, die durch einfache Interpolation der Daten der übrigen statistischen Bezirke gefüllt wurden. Die anschließende Skalen-Transformation zur Verbesserung der Daten-Homogenität bestand aus einem dekadischen Logarithmieren in Abhängigkeit des Wertebereichs der Variablen, wie sie von CASADIO-TARABUSI & PALAZZI (2004) und CASADIO-TARABUSI & GUARINI (2013) vorgeschlagen werden.

Die Notwendigkeit der Normalisierung der Daten ist gegeben, wenn Variablen aggregiert werden sollen, die unterschiedliche Einheiten oder Wertebereiche aufweisen (OECD 2008). Die Variablen wurden über eine einfache Minimum-Maximum-Funktion normalisiert, die alle Variablenwerte auf den Wertebereich [1,2] überträgt, wobei 1 dem Minimal- und 2 dem Ma-

ximalwert entspricht (VINCENT 2004, OECD 2008, TATE et al. 2010, AUBRECHT & ÖZCEYLAN 2013):

$$z_j = (Max - Min) \times \frac{(x_j - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} + Min \quad (3)$$

mit

$z_i$	=	normalisierte Variable
$x_j$	=	Rohvariable
$x_{max}$	=	Maximalwert des Wertebereiches der Rohvariable
$x_{min}$	=	Minimalwert des Wertebereiches der Rohvariable
$Max$	=	Maximalwert des gewünschten Zielwertebereiches, in diesem Fall 2
$Min$	=	Minimalwert des gewünschten Zielwertebereiches, in diesem Fall 1

Der Bereich [1,2] wurde dem sonst üblichen Wertebereich [0,1] vorgezogen, wie er z. B. von VINCENT 2004 oder BUTH et al. 2015 verwendet wird, um Fehlinterpretationen des Wertes Null vorzubeugen, da Null z. B. nicht für *keine Sensitivität* sondern für die *vergleichsweise geringste Sensitivität* steht.

Da keine ausreichend belastbaren Informationen zur differenzierten Gewichtung der Variablen vorlagen, wurden diese gleichwertig behandelt (CUTTER et al. 2003, 2010, REID et al. 2009, AUBRECHT & ÖZCEYLAN 2013). Dies heißt, dass die Indikatoren Klimasignal und Sensitivität mit dem gleichen Gewicht in die Klimawirkung eingingen. Auch die Variablen eines Indikators wurden gleichgewichtet zum Indikator aggregiert. Eine Ausnahme bildet die Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung*, für die die Auswahl von Variablen der sozialen Vulnerabilität eine indirekte Gewichtung bewirkt (vgl. Kapitel 4.5.2).

Die Aggregation von Variablen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Eine Möglichkeit ist die lineare Aggregation, bei der die normalisierten Variablen addiert werden (CHOW et al. 2012, TATE 2012, CUTTER et al. 2014). Eine weitere Möglichkeit ist die geometrische Aggregation; hier werden die Variablen miteinander multipliziert. Die Nutzung einer geometrischen Aggregation verringert Kompensationseffekte zwischen den Variablen und führt nur zu hohen Ergebniswerten, wenn alle Eingangsvariablen hohe Werte aufweisen (OECD 2008, USAID 2014, TATE 2013). Dies entspricht der Logik der IPCC-Vulnerabilitätsbewertung: nur wenn ein hohes Klimasignal auf eine hohe Sensitivität trifft, ergibt sich auch eine hohe Klimawirkung (SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING 2013). Bei der Aggregation von Variablen zum Klimasignal oder zur Sensitivität sind Kompensationseffekte dagegen erwünscht, d. h. eine lineare Aggregation ist zielführend. So führt sowohl das Vorhandensein von vielen älteren Leuten als

auch das von vielen Kleinkindern zu einer erhöhten Sensitivität bzgl. der Wärmebelastung und nicht erst das gemeinsame Vorhandensein beider sensibler Gruppen. Für den vorliegenden Ansatz werden Elemente linearer und geometrischer Aggregation auf den verschiedenen Ebenen genutzt. Die normalisierten Variablen eines Indikators werden linear aggregiert, arithmetisch gemittelt und wieder auf den Wertebereich [1,2] normalisiert (SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING 2013):

$$KS = \left( \frac{KV_1 + KV_2 + \dots + KV_n}{n} \right) \quad (4)$$

$$ST = \left( \frac{SV_1 + SV_2 + \dots + SV_n}{n} \right) \quad (5)$$

mit

$KS$	=	Indikator für das Klimasignal
$ST$	=	Indikator für die Sensitivität
$KV_{l..n}$	=	Variablen des Klimasignals
$SV_{l..n}$	=	Variablen der Sensitivität

Oft fallen Variablen in verschiedene, abgrenzbare Untergruppen, so dass es sinnvoll ist, Subindikatoren zu bilden (VINCENT 2004, CUTTER et al. 2010, 2014, TATE 2012; vgl. Abbildung 21). Setzt sich ein Indikator, wie die Sensitivität oder das Klimasignal, aus Subindikatoren zusammen, wird der Indikator als normalisiertes arithmetisches Mittel der Subindikatoren gebildet, z. B. die Subindikatoren *Hitzesensitive Bevölkerung* und *Wärmeineleffekt* des Sensitivitätsindikators der Klimawirkung *Wärmebelastung der Bevölkerung* (vgl. Kapitel 4.5.3). Die Klimawirkung als Ergebnis wird nachfolgend durch geometrische Aggregation der Indikatoren Klimasignal und Sensitivität gebildet und auf den Wertebereich [1,2] normalisiert (AUBRECHT & ÖZCEYLAN 2013, SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING 2013, BUTH et al. 2015):

$$KW = KS \times ST \quad (6)$$

mit

$KW$	=	Klimawirkung
$KS$	=	Indikator für das Klimasignal
$ST$	=	Indikator für die Sensitivität

Wurden die einzelnen Klimawirkungen ermittelt und normalisiert, werden diese zur Gesamtklimawirkung linear aggregiert, arithmetisch gemittelt und wieder normalisiert (SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING 2013, TATE 2013). Für die Gesamtklimawirkung werden sowohl die im



statistischen Bezirk vorkommenden Klimawirkungen und deren Stärke als auch die nicht vorkommenden Klimawirkungen im Sinne eines Vorteils berücksichtigt. Im Ergebnis erhalten die Bezirke die höchste, d. h. schlechteste, Bewertung, die die meisten Klimawirkungen im Stadtgebiet aufweisen und bei diesen Klimawirkungen auch die höchsten Werte im Vergleich zu den anderen statistischen Bezirken zeigen. Um nicht vorhandene Klimawirkungen im Sinne eines Vorteils in die Bewertung einzubeziehen, ist eine Kombination von absolutem Bezug, d. h. alle Klimawirkungen im Stadtgebiet, und relativem Bezug, d. h. alle Klimawirkungen im statistischen Bezirk, in diesem Fall zielführend. Die kombinierte Gesamtklimawirkung ergibt sich damit nach folgenden Gleichungen:

$$KGKW = \frac{(AGKW + RGKW)}{2} \quad (7)$$

$$KGKW = \frac{\left( \frac{(AKW_1 + AKW_2 + \dots + AKW_m)}{m} + \frac{(RKW_1 + RKW_2 + \dots + RKW_n)}{n} \right)}{2} \quad (8)$$

mit

<i>KGKW</i>	=	Kombinierte Gesamtklimawirkung
<i>AGKW</i>	=	Absolute Gesamtklimawirkung
<i>RGKW</i>	=	Relative Gesamtklimawirkung
<i>AKW<sub>1..m</sub></i>	=	Absolute Klimawirkungen, d. h. alle Klimawirkungen im Stadtgebiet
<i>RKW<sub>1..n</sub></i>	=	Relative Klimawirkungen, d. h. alle Klimawirkungen im statistischen Bezirk

Die Darstellung der Klimasignale, Sensitivitäten und Klimawirkungen erfolgt klassifiziert mittels Standardabweichung (CUTTER et al. 2003, 2014, CHOW et al. 2012, GUILLARD-GONÇALVES et al. 2014) und mit der in Abbildung 22 dargestellten Bewertung.

stark unter- durchschnittlich	schwach unter- durchschnittlich	durchschnittlich	schwach über- durchschnittlich	stark über- durchschnittlich
< -1,5 Std. Dev.	-1,5 - -0,50 Std. Dev.	-0,50 - 0,50 Std. Dev.	0,50 - 1,5 Std. Dev.	> 1,5 Std. Dev.

**Abbildung 22: Klassifizierung und Bewertung von Klimasignalen, Sensitivitäten und Klimawirkungen mittels Standardabweichung.** Dunkelgrün entspricht der stark unterdurchschnittlichen und positivsten Ausprägung, rot der stark überdurchschnittlichen und negativsten Ausprägung des jeweils betrachteten Teilraums (statistischer Bezirk, Einzelfläche) relativ zu den anderen Teilräumen im Untersuchungsgebiet (eigene Darstellung)

#### 4.3.4 Künftige Klimawirkung

Wie in Kapitel 4.2 ausgeführt, muss die Klimawirkung für jede Zeitebene getrennt ermittelt werden, um eine Aussage über die Veränderung der Klimawirkung über die Zeit darstellen zu

können. Dies ist für das Klimasignal aufgrund langjähriger Messreihen und aktueller Klimamodellierungen auf Basis von Emissionsszenarien bis zum Ende des Jahrhunderts grundsätzlich möglich. Jedoch liegen Klimadaten für die *RCP*-Szenarien derzeit nicht in ausreichend hoher Auflösung vor, um Aussagen auf Ebene der statistischen Bezirke treffen zu können. Für die Sensitivität hingegen beschränken sich vorhandene Szenarien zur künftigen Entwicklung einzelner Sensitivitätsvariablen, wie z. B. der Bevölkerung oder der Landnutzung, auf wenige Jahre bis Dekaden. Gleichzeitig können Raumbezüge nur schwer rekonstruierbar sein, z. B. bei der Bevölkerung aufgrund veränderter Verwaltungsstrukturen, weiterhin können Datengrundlagen fehlen oder nicht zugänglich sein, wie z. B. Karten zur Landnutzung oder dem Versiegelungsgrad in der ehemaligen DDR. Aus diesen Gründen werden in der Arbeit keine Klimawirkungen für vergangene oder künftige Klimaperioden analysiert. Es sollen jedoch Trends für Klimasignal und Sensitivität herausgearbeitet werden, die eine qualitative Einschätzung der künftigen Entwicklung der Klimawirkungen ermöglichen.

Zur Abschätzung der künftigen Entwicklung des Klimasignals sollte eine große Bandbreite an Modellergebnissen für verschiedene Emissionsszenarien betrachtet werden, um den Korridor der möglichen Klimaentwicklung aufzuzeigen. Diese Bedingung wird durch die Verwendung des *Climate change atlas* des Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI 2016a) erfüllt. Dieser erlaubt die Abfrage für beliebige geographische Koordinaten und alle vier *RCP*-Szenarios (vgl. Kapitel 2.2.1), wobei für jede Abfrage alle zur Verfügung stehenden Modelldaten, die auch durch den IPCC (2014a) genutzt werden, als Ensemble ausgewertet werden können. Allerdings handelt es sich bei den ausgewerteten Modellen nicht um Regionalmodelle, sondern um Globalmodelle mit geringerer räumlicher Auflösung. Die Menge der verwendeten Modelle und Modellläufe liefert jedoch für die abgefragten Klimaelemente und Kennwerte eine große Bandbreite der möglichen Entwicklung und damit eine höhere Aussagegesicherheit als die Auswertung weniger regionaler Klimamodelle mit nur einem oder zwei *SRE*-Szenarien.

Neben der Veränderung des Klimasignals kann auch eine Veränderung der Sensitivität zu einer Veränderung der Klimawirkung führen. Wie bereits ausgeführt, stehen für die künftige Entwicklung der meisten Variablen der jeweiligen Sensitivität nur wenige Informationen zur Verfügung, die sich auch nur auf einen kurzen Zeitraum erstrecken. Es gibt keine zentrale Datenquelle zur künftigen Entwicklung der Sensitivität ähnlich der des Klimasignals. Ein qualitativer Trend für die Entwicklung der Sensitivitätsvariablen wird anhand verfügbarer Daten und Literatur herausgearbeitet.

#### 4.4 Stationsbezogene Auswertung

In Jena befindet sich die meteorologische Station Jena-Sternwarte, die Teil des Stationsnetzes des DWD ist. Bereits seit 1770 werden hier Messungen vorgenommen, seit 1821 sind Daten verfügbar und ab 1824 stehen fast vollständige Zeitreihen für die wichtigsten Klimaelemente zur Verfügung, die ausgewertet wurden. Jahre mit größeren Datenlücken oder vollständigem Fehlen sind 1821, 1822, 1823 sowie 1870-1878. Zusätzlich wurden Projektionen für die künftige Entwicklung analysiert. Hierfür wurden Daten der statistischen regionalen Klimamodelle *WETTREG 2010* (2016-2100) und *STAR2* (2016-2060) ausgewertet. Alle Daten wurden dem *ReKIS* entnommen. Da für die aktuellen *RCP*-Szenarien des IPCC noch keine regionalisierten Klimamodelldaten zur Verfügung stehen, wurde das häufig verwendete *SRE-A1B*-Szenario genutzt (IPCC 2001, IPCC 2007), das bzgl. des projizierten Verlaufs etwa zwischen *RCP6.0* und *RCP8.5* eingeordnet werden kann. Die Mess- und Modelldaten für den Zeitraum 1824-2100 wurden in der Tabellenkalkulation *Excel* statistisch ausgewertet und für die folgenden Klimaelemente und Kenntage in Diagrammen als 30jährige gleitende Mittel dargestellt:

- Lufttemperatur, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz: gesamtes Jahr, Sommerhalbjahr (April-September), Winterhalbjahr (Oktober-März);
- Sommertage, Heiße Tage, Frosttage, Eistage: Tage pro Jahr;
- Starkregentage, Extremregentage: Tage pro Jahr.

Die temperaturbezogenen klimatologischen Kenntage definieren sich nach DWD (2016b) und sind in Tabelle 5 (S. 52) erläutert. Starkregentage wurden in Anlehnung an GROISMAN et al. (2005) und ZOLINA et al. (2008) definiert als Tage, an denen der Niederschlag  $\geq 12,7$  mm ist, was dem 95. Perzentil der Regentage für die Klimaperiode 1981-2010 entspricht und etwa neunmal pro Jahr auftritt. Entsprechend werden Extremregentage als Tage definiert, an denen der Niederschlag  $\geq 24,4$  mm beträgt, was knapp zweimal pro Jahr vorkommt und dem 99. Perzentil der Regentage für die Klimaperiode 1981-2010 entspricht.

#### 4.5 Wärmebelastung für die Bevölkerung

Die Ausführungen zum Forschungsstand (vgl. Kapitel 2.4.3) und der Übertragung des konzeptionellen Rahmens auf Jena (vgl. Kapitel 4.3.3) haben gezeigt, dass Indikatorenansätze für den Anspruch und die Zielgruppe am besten geeignet sind, um die Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung* auf städtischer Ebene zu bestimmen, insofern sie Indikatoren zum Klimasignal und zur Sensitivität integrieren. Die Analyse wurde mit der Standardsoftware

*ESRI ArcGIS* und *Microsoft Excel* durchgeführt. Kursive Begriffe in Klammern verweisen in der Methodenbeschreibung auf die verwendeten *ArcGIS*-Funktionen.

#### 4.5.1 Klimasignal

Als Indikator für das Klimasignal wird die Anzahl Heißer Tage gewählt, eine klimatologische Kenngröße, die in zahlreichen praxisorientierten Anpassungskonzepten genutzt wird (BÖHM et al. 2011, STORCH & CLAUSSEN 2011, KURMUTZ et al. 2012, STEINRÜCKE et al. 2013).

Für die Analyse der Heißen Tage wurden die Tagesraster der maximalen Lufttemperatur für die Gegenwart (1981-2010) aus *ReKIS* heruntergeladen. Die Rasterdaten in *ReKIS* wurden höhenabhängig ohne Berücksichtigung der Landnutzung interpoliert. Die resultierenden 10.957 ASCII-Rasterdatensätze wurden im nächsten Schritt klassifiziert (*Reclassify*), so dass Rasterzellen mit Werten kleiner 30 eine Null, Rasterzellen mit Werten ab 30 eine Eins zugewiesen wurde. Dies erfolgte mittels einer Schleifenfunktion (*ModelBuilder*), die die Rasterdatensätze automatisch klassifizierte. Nachfolgend wurden die reklassifizierten Rasterdatensätze pro Jahr summiert, womit für jede Rasterzelle im Untersuchungsgebiet die Anzahl Heißer Tage für jedes Jahr 1981-2010 und, nach einer weiteren Aggregation, für jede Dekade (1981-1990, 1991-2000, 2001-2010) als auch für die Klimaperiode 1981-2010 vorlag.

Aus dem Raster der Heißen Tage für 1981-2010 wurden für die 41 statistischen Bezirke Jena mittlere jährliche Anzahlen Heißer Tage abgeleitet (*Zonal statistics as table*). Hier, und bei allen anderen Klimasignaldaten mit einer Auflösung von 1.000 m, wurde die Rasterzellengre der Analyse auf 100 m gesetzt, da bei originaler Auflösung von 1.000 m für kleinere statistische Bezirke aufgrund geringer Zellenanzahl keine Ergebniswerte für die Anzahl Heißer Tage geliefert werden kann. Hier zeigt sich die eingeschränkte Aussagekraft von Klimadaten mit 1.000 m Auflösung gegenüber Flächengrößen der statistischen Bezirke von wenigen Quadratkilometern.

#### 4.5.2 Sensitivität

Die Sensitivität gegenüber dem Klimasignal setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: einem Subindikator für den urbanen Wärmeinseleffekt mit vier Variablen und einem Subindikator für die hitzesensitive Bevölkerung mit sechs Variablen. Der Subindikator zum Wärmeinseleffekt ist notwendig, da die Klimadaten aus *ReKIS* keine Landnutzungen berücksichtigen, sondern nur auf einer höhenabhängigen Interpolation der Temperatur beruhen.

### ***Wärmeinseleffekt***

Der Wärmeinseleffekt ist umso stärker, je stärker die Versiegelung im urbanen Raum und je größer die zusammenhängende versiegelte Fläche ist. Zur Beschreibung der Stärke des Wärmeinseleffektes eignen sich somit Datensätze zur Versiegelung (KUTTLER et al. 1996, CHEN et al. 2006, YUAN & BAUER 2007).

Die Ermittlung des Wärmeinseleffektes erfolgte anhand von Daten der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) zur Flächenversiegelung in Thüringen. Der Datensatz basiert auf Satellitenbildern des SPOT-Sensors aus den Jahren 2004 bis 2006. Die Daten liegen im Vektorformat in sechs Versiegelungsstufen vor:

- 0 % bis unter 20 % (Stufe 1)
- 20 % bis unter 40 % (Stufe 2)
- 40 % bis unter 60 % (Stufe 3)
- 60 % bis unter 80 % (Stufe 4)
- 80 % bis unter 100 % (Stufe 5)
- 100 % (Stufe 6)

Der Datensatz wurde von Überlandstraßen, die außerhalb der geschlossenen Ortslagen zu finden sind, gereinigt, da diese keinen Einfluss auf den Wärmeinseleffekt ausüben. Nachfolgend wurden vier Parameter aus dem Datensatz abgeleitet, die das Potenzial zur Ausbildung einer Wärmeinsel charakterisieren sollen: mittlerer Versiegelungsgrad, Größe der versiegelten Fläche, Fragmentierungsgrad und Naturferne.

Für die Berechnung des mittleren Versiegelungsgrades in den statistischen Bezirken wurden die Vektordaten in *ArcGIS* in ein Rasterformat mit 20 m Auflösung gewandelt, da die originalen SPOT-Daten Pixelgrößen von 8-12 m aufweisen, und anschließend das Flächenmittel der statistischen Bezirke gebildet (*Zonal statistics as table*). Die Größe der versiegelten Fläche in den statistischen Bezirken ergibt sich aus der Anzahl der Rasterzellen und Rasterzellengröße.

Die Parameter Fragmentierungsgrad und Naturferne folgen der Annahme, dass ein versiegelter Bereich potenziell stärker überwärmt ist, je kompakter er ist und je räumlich entfernt er sich von naturnahen bzw. unversiegelten Flächen befindet. Demzufolge ist ein langgestreckter versiegelter Bereich, wie z. B. ein Quartier oder Stadtteil, der auf allen Seiten von nicht-urbanen Landnutzungen, wie z. B. Ackerland oder Wald, umgeben ist, weniger stark vom Wärmeinseleffekt betroffen als ein versiegelter Bereich, der eher rund, oval oder rechteckig ist und an andere versiegelte Bereiche angrenzt, wie z. B. die Innenstadt. Dies ist dadurch begründet, dass der Luftaustausch zwischen urbanen und naturnahen Bereichen durch Flur-

winde oder Kaltluftströme im Fall der langgestreckten, direkt an naturnahe Bereiche grenzenden, versiegelten Flächen effektiver ist, da die Luftmassen besser in den versiegelten Bereich eindringen können, als bei innerstädtischen Flächen. Demzufolge ist der Wärmeinseleffekt in statistischen Bezirken mit hohem Fragmentierungsgrad der versiegelten Flächen und geringer Naturferne am schwächsten.

Der Fragmentierungsgrad beschreibt das Verhältnis von Umfang zu Fläche des versiegelten Bereiches in den statistischen Bezirken und wurde anhand des bereinigten Vektordatensatzes zur Flächenversiegelung ermittelt (*Calculate geometry*). Für die Naturferne wurde der Datensatz der Flächenversiegelung in den statistischen Bezirken mit sich selbst in der Art verschnitten, dass sich die gemeinsamen Grenzen der versiegelten Bereiche der statistischen Bezirke ergeben (*Intersect* mit *Output type: Line*). Der Linien-Vektordatensatz der gemeinsamen Grenzen wurde dann nach statistischen Bezirken summiert (*Summarize*) und die entstandene Tabelle wieder mit dem Datensatz der Flächenversiegelung in den statistischen Bezirken verknüpft (*Table join*). Dadurch resultierte der Parameter Naturferne als Verhältnis aus Grenzlinienlänge versiegelter Bereiche des statistischen Bezirks und dessen Umfang.

### ***Hitzesensitive Bevölkerung***

Verschiedene Bevölkerungsgruppen sind unterschiedlich stark von Hitzestress betroffen (vgl. Kapitel 2.4.1). Statistische Daten, die in Kommunen oder statistischen Landesämtern vorliegen, können zur weiteren Differenzierung der Sensitivität der Bevölkerung gegenüber sommerlicher Wärmebelastung genutzt werden. Studien, die die soziale Vulnerabilität in ihre Analysen einbeziehen, nutzen oft eine große Zahl an demographischen und sozio-ökonomischen Variablen (z. B. CUTTER et al. 2003, LOUGHNAN et al. 2009, REID et al. 2009, JOHNSON et al. 2012). Diese Variablen entstammen vor allem in den USA oft Zensus-Daten auf Blockebene, die für die Bundesrepublik in dieser Detailliertheit nicht öffentlich vorliegen und damit selten zur Anwendung kommen (z. B. KRÜGER et al. 2013). Hier wird auf eine geringere Anzahl an Variablen zurückgegriffen (Tabelle 8, S. 73), die in allen deutschen Kommunen verfügbar ist und trotzdem einen Großteil der Varianz der sozialen Vulnerabilität erklärt (CUTTER et al. 2003, TATE et al. 2010, CHOW et al. 2012, WOLF & MCGREGOR 2013). Für die Variablen wurden absolute Werte genutzt, da dies eher der Perspektive einer kommunalen Verwaltung und ihrer strategischen Planung entspricht (vgl. Kapitel 4.3.3).

**Tabelle 8: Variablen zur Beschreibung der hitzesensitiven Bevölkerung (eigene Darstellung)**

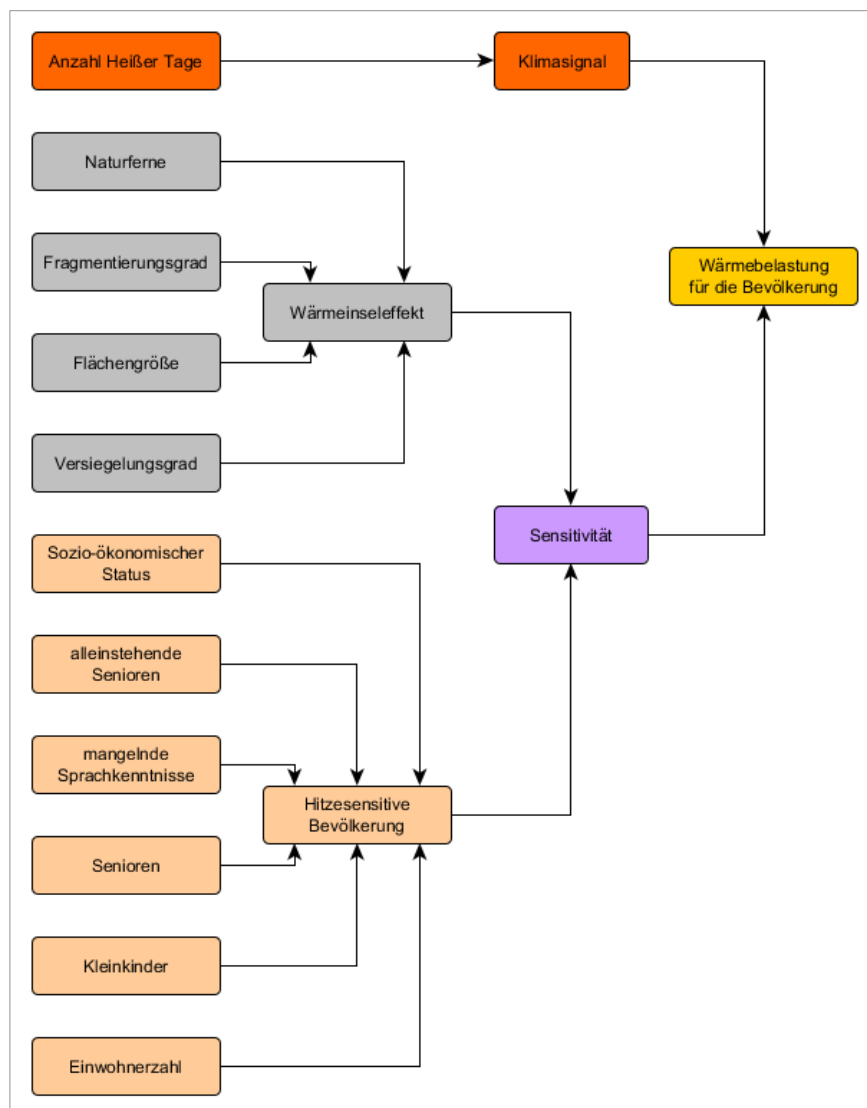
<b>Vulnerable Gruppe</b>	<b>Verwendete Variable</b>	<b>Einfluss auf die soziale Vulnerabilität</b>	<b>Beispiele für die Anwendung</b>
Einwohner	Einwohner mit Hauptwohnsitz	Je mehr, desto höher	• CUTTER et al. 2000
Kleinkinder	Einwohner mit Hauptwohnsitz: 0 bis 5 Jahre	Je mehr, desto höher	• CUTTER et al. 2003 • LOUGHNAN et al. 2009 • EMRICH & CUTTER 2011
Senioren	Einwohner mit Hauptwohnsitz: ab 65 Jahre	Je mehr, desto höher	• CUTTER et al. 2003 • LOUGHNAN et al. 2009 • EMRICH & CUTTER 2011
Personen mit mangelnden deutschen Sprachkenntnissen	Ausländer mit Wohnsitz in Jena	Je mehr, desto höher	• CUTTER et al. 2003 • AUBRECHT & ÖZCEYLAN 2013 • GUILLARD-GONÇALVES et al. 2014
Alleinlebende Senioren	Einpersonenhaushalte: ab 60 Jahre	Je mehr, desto höher	• REID et al. 2009 • JOHNSON et al. 2012 • WOLF & MCGREGOR 2013
Personen mit niedrigem sozio-ökonomischen Status	Leistungsempfänger von ALG II oder Sozialgeld	Je mehr, desto höher	• CUTTER et al. 2003 • REID et al. 2009 • EMRICH & CUTTER 2011 • JOHNSON et al. 2012 • AUBRECHT & ÖZCEYLAN 2013

Die Einwohnerzahl wird selten zur Beschreibung der Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitzestress herangezogen. Zwar werden die besonders sensitiven Bevölkerungsgruppen herausgestellt, die „normal sensitive“ Bevölkerung wird jedoch oft vernachlässigt, wie z. B. bei BUTH et al. (2015) oder SCHMIDT et al. (2011). Dies ist inkonsequent, da auch Menschen zwischen 6 und 64 Jahren unter sommerlichen Hitzeperioden leiden. Die Aufnahme der Einwohnerzahl in einen Indikator zur Wärmebelastung ist wichtig, führt im Ergebnis aber indirekt zu einer höheren Gewichtung der besonders sensitiven Bevölkerungsgruppen. Diese Gewichtung ist jedoch gerechtfertigt, da zahlreiche Studien die besonders hohe Sensitivität dieser Bevölkerungsgruppen herausstellen (vgl. Kapitel 2.4.1, Tabelle 8).

Die in Tabelle 8 aufgeführten Daten wurden von Jenaer Arbeit sowie der Statistikstelle der Stadt Jena bezogen (STJE 2016c). Für einige Variablen traten für einzelne statistische Bezirke Datenlücken aufgrund des Datenschutzes auf. Diese wurden durch einfache Interpolation gefüllt: Bei bekannter Gesamtzahl der Bevölkerung in den statistischen Bezirken wurden Fehlwerte von Variablen aus dem Verhältnis der Bevölkerung im jeweiligen statistischen Bezirk zur Gesamtbevölkerung der Stadt abgeleitet. Stand der Daten ist der 31.12.2013 mit Ausnahme der Gruppe der Empfänger von Sozialgeld (30.06.2014). Trotz der zeitlichen Abweichung zu den Klimadaten (1981-2010) wurden die, zum Zeitpunkt der Erstellung, aktuellsten verfügbaren Daten genutzt.

### 4.5.3 Klimawirkung der Gegenwart

Die Klimawirkung der *Wärmebelastung für die Bevölkerung* in der Gegenwart ergab sich durch die Aggregation der Variablen des Klimasignals und der Sensitivität, wie sie in Abbildung 23 dargestellt ist. Hierzu wurden die Daten zur hitzesensitiven Bevölkerung direkt, die Daten zum Klimasignal und dem Wärmeinseleffekt nach dem Export aus dem GIS, in die Tabellenkalkulation geladen und entsprechend den in Kapitel 4.3.3 genannten Schritten weiterverarbeitet.



**Abbildung 23: Aggregation der Variablen und Indikatoren zur Klimawirkung Wärmebelastung für die Bevölkerung (eigene Darstellung)**

Datenlücken traten nur bei einigen Variablen des Subindikators der hitzesensitiven Bevölkerung auf und wurden behoben. Es folgten die Skalen-Transformation mittels eines dekadischen Logarithmus und die Normalisierung auf den Wertebereich [1,2]. Bei der Aggregation der Variablen des Subindikators der hitzesensitiven Bevölkerung gingen die besonders sensi-



tiven Bevölkerungsgruppen höher gewichtet ein. Die Gewichtung aller anderen Variablen und Subindikatoren, sowie von Klimasignal und Sensitivität war gleichwertig. Die Aggregation zur Klimawirkung enthält Elemente linearer und geometrischer Aggregation. Die sechs normalisierten Variablen des Subindikators der hitzesensitiven Bevölkerung wurden linear aggregiert und arithmetisch gemittelt. Ebenso wurde für die vier Variablen des Subindikators zum Wärmeinseleffekt verfahren. Das Klimasignal ging direkt ein, da es nur aus einer normalisierten Variable besteht. Die Klimawirkung auf Ebene der statistischen Bezirke wurde anschließend durch geometrische Aggregation des Sensitivitäts- und des Klimasignalindikators gebildet (BUTH et al. 2015) und wieder auf den Wertebereich [1,2] normalisiert. Folgende Gleichungen veranschaulichen die Bestimmung von Klimasignal, Sensitivität und Klimawirkung:

$$KS_{WBB} = HT \quad (9)$$

$$ST_{WBB} = \frac{\left( \frac{(EW + SE + KK + MS + AS + SÖ)}{6} + \frac{(VG + VF + FG + NF)}{4} \right)}{2} \quad (10)$$

$$KW_{WBB} = KS_{WBB} \times ST_{WBB} \quad (11)$$

mit

$KS_{WBB}$	=	Klimasignal der Wärmebelastung für die Bevölkerung im statistischen Bezirk
$HT$	=	Mittlere jährliche Anzahl Heiße Tage für die Periode 1981-2010 im statistischen Bezirk
$ST_{WBB}$	=	Sensitivität der Wärmebelastung für die Bevölkerung im statistischen Bezirk
$EW$	=	Anzahl der Einwohner mit Hauptwohnsitz im statistischen Bezirk
$SE$	=	Anzahl der Einwohner mit Hauptwohnsitz ab 65 Jahre im statistischen Bezirk
$KK$	=	Anzahl der Einwohner mit Hauptwohnsitz 0 bis 5 Jahre im statistischen Bezirk
$MS$	=	Anzahl der Ausländer mit Wohnsitz in Jena im statistischen Bezirk
$AS$	=	Anzahl der Einpersonenhaushalte ab 60 Jahre im statistischen Bezirk
$SÖ$	=	Anzahl der Personen mit niedrigem sozio-ökonomischen Status im statistischen Bezirk
$VG$	=	Mittlerer Versiegelungsgrad im statistischen Bezirk
$VF$	=	Versiegelte Fläche im statistischen Bezirk
$FG$	=	Fragmentierungsgrad des statistischen Bezirks
$NF$	=	Naturferne des statistischen Bezirks
$KW_{WBB}$	=	Klimawirkung der Wärmebelastung für die Bevölkerung im statistischen Bezirk

#### 4.5.4 Künftige Klimawirkung

Zur Abschätzung der Veränderung des Klimasignals wird der *Climate change atlas* verwendet. Da der klimatologische Kenntag der Anzahl Heiße Tage hier nicht zur Verfügung steht, wurden die Variablen *maximum near-surface temperature*, die maximale bodennahe Lufttemperatur, und *TX90p*, der Prozentsatz der Tage, an denen die tägliche Maximaltemperatur über dem 90. Perzentil der Verteilung liegt, ausgewählt und statistisch ausgewertet. Hierfür wurden

alle vorhandenen Modelldaten für die vier *RCP*-Szenarien in einem Diagramm dargestellt, das die Veränderung der ausgewählten Klima-Variablen zwischen den Perioden 1981-2010 und 2071-2100 zeigt. Zusätzlich wird die, im *JenKAS*-Projekt durchgeführte, *MUKLIMO\_3*-Modellierung des DWD zur Veränderung der Heißen Tage in Jena zwischen 1971-2000 und 2021-2050 zur Beurteilung herangezogen. Die Modellierung nutzt Projektionen der Regional-klimamodelle *CLM*, *REMO*, *STAR* und *WETTREG 2006* für das *SRE*-Szenario *A1B*.

Neben der Veränderung des Klimasignals kann auch eine Veränderung der Sensitivität zu einer Veränderung der Klimawirkung führen. Die Veränderung der Sensitivität für die Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung* wurde einerseits anhand der Entwicklung der Bevölkerung untersucht. Mit steigender Bevölkerungszahl sowie zunehmenden Anteilen an Kleinkindern und Senioren steigt die Anzahl (besonders) hitzesensitiver Personen. Andererseits wurde die Entwicklung des Flächenverbrauchs analysiert. Je größer die versiegelte Fläche und je stärker die Überbauung dieser, desto stärker der Wärmeinseleffekt und somit die Sensitivität. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche, als Summe aus Gebäude- und Freifläche, Betriebsfläche ohne Abbau- und Erholungsfläche, Verkehrsfläche und Friedhöfen, ist eine gute Annäherung an die versiegelte Fläche und wird in diesem Sinne auch als Indikator für die Flächeninanspruchnahme genutzt (SBA 2015c).

#### 4.6 Trockenstress für die Vegetation

Wie in Kapitel 2.5.1 dargestellt wurde, kann Trockenstress in unterschiedlichen Zusammenhängen auftreten. Je nach naturräumlicher Ausstattung des Untersuchungsgebietes kann zwischen Trockenstress auf Ackerflächen, auf Waldflächen und für Stadtbäume unterschieden werden. Das Stadtgebiet Jenas besteht zu etwa 17 % aus Acker- und zu rund 32 % aus Waldflächen. Zudem stehen ca. 40 Tsd. Stadtbäume auf öffentlichen Flächen (HALBIG et al. 2016). Somit sind alle drei Trockenstress-Komponenten für Jena relevant und wurden in der Arbeit untersucht. Der Forschungsstand zeigte, dass für alle drei Komponenten und für die Anwendergruppe Indikatorenansätze zur Bestimmung des Trockenstressrisikos geeignet sind (vgl. Kapitel 2.5.3). Die Ansätze für die Wald- und Stadtbäume, die sich auf *KLAM-Wald* (ROLOFF & GRUNDMANN 2008) und *KLAM-Stadt* ROLOFF et al. (2008, 2009) beziehen, müssen jedoch zusätzlich Klimasignale integriert werden, die bisher nicht explizit berücksichtigt wurden. Die Analysen wurden mit der Standardsoftware *ESRI ArcGIS* und *Microsoft Excel* durchgeführt. Kursive Begriffe in Klammern verweisen in der Methodenbeschreibung auf die verwendeten *ArcGIS*-Funktionen.

#### 4.6.1 Klimasignal

##### *Ackerflächen*

Als Klimasignal wird die klimatische Wasserbilanz (KWB) verwendet. Wie in Kapitel 2.5.3 erläutert, wird hierzu nicht die KWB in der Hauptvegetationszeit von Mai bis September, sondern die zeitlich umfänglichere KWB der ackerbaulichen thermischen Vegetationsperiode genutzt, um die zeitlich differierenden Wasseransprüche der Ackerkulturen besser berücksichtigen zu können. Für die Abgrenzung der thermischen Vegetationsperiode für landwirtschaftliche Kulturen in den mittleren Breiten wird oft eine einfache Temperaturschwelle von z. B. 5 °C mittlerer Tagestemperatur (MENZEL et al. 2003, CHMIELEWSKI 2007, TRNKA et al. 2011, TMLFUN 2013, POTOPOVÁ et al. 2015) oder der erste von fünf, teilweise auch sechs oder sieben, aufeinanderfolgenden Tagen mit 5 °C mittlerer Tagestemperatur genutzt (FRICH et al. 2002, MITCHEL & HULME 2002, SCHEFFLER & FRÜHAUF 2011), gelegentlich auch Temperatursummen (BUTH et al. 2015). Entsprechend fällt der letzte Tag der thermischen Vegetationsperiode auf den letzten Tag mit einer mittleren Tagestemperatur von 5 °C bzw. auf den letzten Tag mit 5 °C mittlerer Tagestemperatur vor einer mindestens fünftägigen Periode mit einer mittleren Tagestemperatur unter 5 °C. Selten wird erwähnt, wie mit einem kurzzeitigen Abfall der Tagestemperatur unter die gewählte Schwelle verfahren wird und ob dies die Vegetationsperiode unterbricht und die Zählung neu startet. Hier wird deshalb dem Ansatz von CHMIELEWSKI & KÖHN (2000) bzw. CHMIELEWSKI (2013) gefolgt, die den Beginn der thermischen Vegetationsperiode auf den ersten Tag mit einer mittleren Tagestemperatur ab 5 °C setzen, mit der Bedingung, dass die Summe der Differenzen zu 5 °C der folgenden 30 Tage positiv bleibt. Somit ist der Beginn der thermischen Vegetationsperiode unabhängig von kurzen Schwankungen der mittleren Tagestemperatur. Das Ende der thermischen Vegetationsperiode ist definiert als der erste Tag, an dem die Mitteltemperatur unter 5 °C liegt und die Summe der Differenzen zu 5 °C der restlichen Tage des Jahres negativ ist.

Zur Ermittlung der ackerbaulichen thermischen Vegetationsperiode wurden zuerst die Tagesraster der mittleren Tagestemperatur für die Gegenwart (1981-2010) aus *ReKIS* entnommen. Anschließend wurden die Vektordaten für die Flächennutzung Ackerland aus dem *ATKIS-Basis-DLM* (Basis-Landschaftsmodell des Amtlichen Topografisch-Kartografischen Informations-System) entnommen und auf 10 m Auflösung gerastert (*Polygon to raster*). Folgend wurde ein Modell mit Schleifenfunktion erstellt und für alle 10.957 ASCII-Rasterdatensätze zur täglichen Mitteltemperatur folgende Berechnungen durchgeführt (*ModelBuilder*):

- Bildung eines Temperaturmittelwertes für die Ackerfläche Jenas (*Zonal statistics*)
- Anlegen einer Attributtabelle für das Raster (*Build raster attribute table*)
- Export der Rasterattributtabelle als DBF-Tabelle (*Table to table*)

Daraufhin wurden die 10.957 DBF-Tabellen zusammengeführt (*Merge*) und in die Tabellenkalkulation geladen, wo die Überschreitungs- und Unterschreitungstage als auch die Temperaturdifferenzsummen zu 5 °C für den Beginn und das Ende der Vegetationsperiode der Jahre 1981-2010 berechnet wurde.

Für die Ermittlung der KWB in der thermischen Vegetationsperiode wurden die Tagesraster des korrigierten Niederschlags und der potenziellen Verdunstung für die Jahre 1981-2010 aus *ReKIS* entnommen. Anschließend wurden die Tagesraster der KWB als Differenz aus korrigiertem Niederschlag und potenzieller Verdunstung in einem Modell mit Schleifenfunktion berechnet (*ModelBuilder*) und anhand der ermittelten Anfangs- und Endzeitpunkte der ackerbaulichen thermischen Vegetationsperiode jahresweise summiert (*Weighted sum*). Aus den Jahresrastern der KWB wurde das Mittel für die Klimaperiode 1981-2010 berechnet (*Raster calculator*). Zum Schluss wurden daraus die Ackerflächen extrahiert (*Extract by mask*) und das Flächenmittel der KWB auf den Ackerflächen für die statistischen Bezirke bestimmt (*Zonal statistics as table*).

### **Waldflächen**

Mit den, im Zuge des Klimawandels, steigenden Temperaturen verlängert sich auch die forstliche Vegetationszeit (vgl. Kapitel 2.5.2). Zur Abgrenzung der forstlichen Vegetationszeit für Waldflächen wird daher ein Temperaturschwellwert eingesetzt, anstatt eine vereinfachende Betrachtung mittels Monatswerten zu nutzen, wie z. B. Mai bis September (AK-SK 2003, VASCONCELOS 2013). Dazu wird der in Sachsen und Thüringen verwendete Schwellwert von 10 °C Tagesmitteltemperatur genutzt (GEMBALLA et al. 2007, FRISCHBIER & PROFFT 2008, TMLFUN 2013). Er ist pflanzenphysiologisch relevant, da die mittleren Daten der Blattentfaltung und der Überschreitung des 10 °C-Temperaturmittels zeitlich dicht beieinander liegen, und die mittlere 10 °C-Vegetationszeit meist nur wenige Tage kürzer ist als die phänologische Wachstumszeit von der Blattentfaltung bis zum Beginn der Laubfärbung (AK-SK 2003). Nach FRISCHBIER (2014) beginnt die forstliche Vegetationszeit am ersten Tag der ersten Periode von mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur von 10 °C oder mehr und endet am letzten Tag der letzten Periode von fünf aufeinanderfolgenden

Tagen mit mindestens 10 °C Tagesmitteltemperatur, unabhängig davon, ob die Tagesmitteltemperatur zwischenzeitlich unter 10 °C fällt.

Die Ermittlung der forstlichen, thermischen Vegetationszeitlänge und der KWB in der Vegetationszeit erfolgte vergleichbar zur ackerbaulichen Vegetationsperiode, jedoch mit der Flächenkulisse der Waldgebiete, die von ThüringenForst bereitgestellt wurde: Berechnung der mittleren täglichen Temperatur für die Waldfläche, Ermittlung der Vegetationszeitlänge für alle Einzeljahre und die Klimaperiode 1981-2010, Bildung der täglichen KWB aus Rasterdatensätzen des korrigierten Niederschlags und der potenziellen Verdunstung, Summierung der KWB-Tagesraster in der forstlichen Vegetationszeit anhand der individuellen Beginn- und Enddaten für jedes Jahr und Mittelwertbildung für die Klimaperiode 1981-2010 sowie Bildung des Flächenmittels für die Waldfläche jedes statistischen Bezirks.

### ***Stadtbäume***

Stadtbäume unterliegen der gleichen physiologischen Funktionsweise wie Waldbäume. Demzufolge wurde zur Abgrenzung der thermischen Vegetationszeit für Stadtbäume die gleiche Methodik wie für Waldflächen verwendet. Dies bedeutet, die ersten fünf Tage mit mindestens 10 °C Tagesmitteltemperatur beginnen die Vegetationszeit, die letzten fünf Tage mit mindestens 10 °C Tagesmitteltemperatur beenden sie (FRISCHBIER 2014). Die Ermittlung der KWB in der thermischen Vegetationszeit erfolgte nach dem Vorbild der Waldflächen. Als Flächenkulisse wurde die geschlossene Ortslage in den statistischen Bezirken aus dem *ATKIS-Basis-DLM* verwendet.

## **4.6.2 Sensitivität**

### ***Ackerflächen***

Für die Ermittlung der Sensitivität gegenüber Trockenstress im statistischen Bezirk spielt das pflanzenverfügbare Wasser auf den Ackerflächen und die Größe der Ackerflächen die Hauptrolle. Das pflanzenverfügbare Wasser ( $W_{pfl}$ ) setzt sich aus kapillarem Aufstieg aus dem Grundwasser ( $KA$ ) und nutzbarer Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ( $nFKWe$ ) zusammen, bei grundwasserfernen Standorten ist es gleich der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (SCHEFFER et al. 2010, AG BODEN 2005). Da keine digitalen Bodenkarten mit Informationen zur nutzbaren Feldkapazität für Jena vorliegen, wurde der Ansatz des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie und des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz verfolgt (HLUG & LGBRP 2008). Dabei werden aus den Klassenzeichen

der Bodenschätzung großmaßstäbige Informationen zu Bodenfunktionen gewonnen. Dieser empirisch validierte Ansatz erlaubt die Bestimmung der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum. Die Ableitung des kapillaren Aufstiegs war nicht möglich, da keine Bodenkarten für Jena existieren, aus denen der kapillare Aufstieg oder die Bodenartenuntergruppe entnommen werden kann. Nach AG BODEN (2005) kann der kapillare Aufstieg in der Vegetationsperiode auch unter Kenntnis der Bodenartenuntergruppe, des effektiven Wurzelraums, des Grundwasserabstands und der Vegetationszeitlänge ermittelt werden. Verschiedentlich wurde versucht, die Bodenartenuntergruppe aus Bodenart und Entstehungsart des Klassenzeichens der Bodenschätzung abzuleiten (WALLBAUM 1991, PREETZ 2003). Nach Ansicht von GEHRT (2015) ist dieses Vorgehen jedoch problematisch und wurde daher nicht weiter verfolgt. Somit standen keine Informationen zum kapillaren Aufstieg zur Verfügung und das pflanzenverfügbare Wasser wurde der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum gleichgesetzt.

Für die Ermittlung der nutzbaren Feldkapazität wurden zuerst Bodenart und Bodenzahl für die Leitbodenformen Jenas aus der bodengeologischen Übersichtskarte Thüringens bestimmt (RAU et al. 2000). Sodann wurde mittels Bodenzahl und dem bodenartenabhängigen Faktor aus VORDERBRÜGGE et al. (2004) und HLUG & LGBRP (2008) die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum für die Leitbodenformen Jenas berechnet. Danach folgte die Rasterung der Bodenkarte (*Polygon to raster*) und die Verschneidung mit den Ackerflächen (*Extract by mask*). Die mittleren nutzbaren Feldkapazitäten im effektiven Wurzelraum der Ackerflächen in den statistischen Bezirken wurden anschließend berechnet (*Zonal statistics as table*). Die Ackerflächengrößen in den statistischen Bezirken ergaben sich aus dem Vektordatensatz zum Ackerland. Statistische Bezirke ohne Ackerflächen oder kleiner 1 ha wurden nicht betrachtet.

### **Waldflächen**

Die Sensitivität der Waldflächen wird über die mittlere Eignung nach *KLAM-Wald* und Waldflächengröße im statistischen Bezirk ermittelt. Dazu werden als Eingangsdaten Hauptbaumarten und Standorteigenschaften verwendet, die von ThüringenForst für das Stadtgebiet bereitgestellt wurden. 90 % der Waldflächen sind von sechs Hauptbaumarten bedeckt (Abbildung 24, S. 81). Den Hauptbaumarten der Waldflächen Jenas wurden ihre Eignungswerte nach *KLAM-Wald* zugeordnet (ROLOFF & GRUNDMANN 2008). Für Arten, für die nur der Gattungsname vorlag, wie z. B. *Tilia spec.*, wurde ein Mittel der *KLAM-Wald*-Werte aus den übrigen Arten der Gattung, d. h. allen *Tilia*-Arten, die im Jenaer Stadtgebiet vorkommen, gebildet. Insgesamt konnten rund 98 % der Jenaer Waldflächen *KLAM-Wald*-Werte zugeordnet werden.

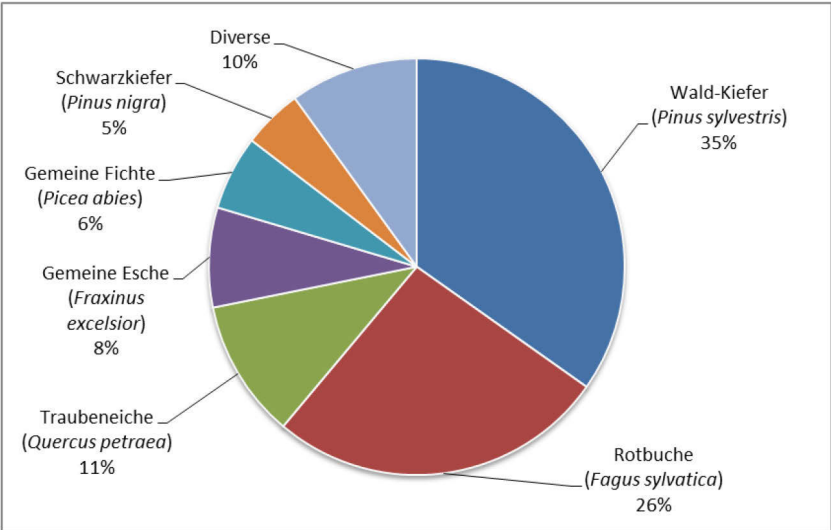


Abbildung 24: Anteile der Hauptbaumarten auf Waldflächen im Jenaer Stadtgebiet (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt wurden den Standorteigenschaften, d. h. der Feuchtestufe, der Waldflächen mittels Tabelle 9 Standortbereichstypen nach *KLAM-Wald* zugewiesen (TLWF 2002, ROLOFF & GRUNDMANN 2008). Dabei konnten ca. 94 % der Waldflächen abgedeckt werden. Durch die vorliegende Kombination aus Hauptbaumart und Feuchtestufe am Standort konnten den einzelnen Waldflächen Eignungswerte nach *KLAM-Wald* zugeordnet werden (*Field calculator*). Waldflächen, für die keine Standorteigenschaften vorlagen, wurden nicht berücksichtigt. Die Vektordaten der Waldflächen inkl. Information zur Eignung wurden dann gerastert (*Polygon to raster*) und die mittlere *KLAM-Wald*-Eignung der Waldflächen in den statistischen Bezirken ermittelt (*Zonals statistics as table*). Die Größe der jeweiligen Waldflächen in den Bezirken wurde dem Vektordatensatz entnommen (*Calculate geometry*). Statistische Bezirke ohne Waldflächen oder kleiner 1 ha wurden nicht betrachtet.

Tabelle 9: Zuordnung von Bodenfeuchtestufen des ThüringenForstes zu Standortbereichen der *KLAM-Wald* für das Stadtgebiet Jenas (eigene Darstellung)

Bodenfeuchtebereich und Feuchtestufen für Thüringen	Standortbereiche der KLAM-Wald
Feucht (A1, B1)	Nass bis sehr frisch
Frisch (B2), Wechselfrisch (W2)	Ziemlich frisch bis frisch
Sehr frisch bis frisch (T1)	Mittelwert der Klassen „nass bis sehr frisch“ und „ziemlich frisch bis frisch“
Mäßig frisch (T2), Mäßig trocken (T3)	Mäßig frisch bis mäßig trocken
Trocken (T4), Sehr trocken bis extrem trocken (TX)	Trocken bis sehr trocken

Stadtbäume

Die Sensitivität der Stadtbäume wurde über die Eignung der Baumart nach *KLAM-Stadt* und die Anzahl an Stadtbäumen in den statistischen Bezirken abgebildet. Stadtbäume bezeichnen in diesem Kontext Bäume auf öffentlichen Flächen, für die die Kommune als Flächeneigentümer eine Verkehrssicherungspflicht hat. Es gibt wesentlich mehr Stadtbäume, z. B. auf pri-

vaten Grundstücken, für die jedoch keine Inventare existieren und die somit nicht berücksichtigt werden können. Von den etwa 40 Tsd. Stadtbäumen Jenas (HALBIG et al. 2016), enthielt das städtische Baumkataster, das vom KommunalService Jena (KSJ) bereitgestellt wurde, im Oktober 2014 rund 14 Tsd. Einzelbäume mit Standortkoordinaten und Artnamen. Die Verteilung auf die Gattungen zeigt Abbildung 25 (S. 83), wobei Ahorn, Linde und Esche die größten Anteile besitzen. Die häufigsten Arten sind die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*, 12,2 %), Berg-, Spitz- und Feldahorn (*Acer pseudoplatanus*, 8,8 %; *Acer platanoides*, 7,6 %; *Acer campestre*, 5,8 %) sowie die Winterlinde (*Tilia cordata*, 4,9 %). Den einzelnen Arten wurde in der Tabellenkalkulation eine Eignungsklasse nach *KLAM-Stadt* (ROLOFF et al. 2008) in folgender Weise zugewiesen (vgl. Abbildung 11, S. 40):

- Grün: sehr gut geeignet; Notenpaare 1.1, 1.2, 1.3 → Klasse 1,
- Grün-gelb: gut geeignet; Notenpaare 2.1, 2.2 → Klasse 2,
- Gelb: geeignet, aber zum Teil problematisch; Notenpaare 2.3, 3.1, 3.2, 3.3 → Klasse 3,
- Rot: sehr eingeschränkt geeignet; Notenpaare 1.4, 2.4, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3 → Klasse 4,
- Violett: ungeeignet; Notenpaar 4.4 → keine Zuordnung, da nicht vorhanden.

Arten, die nicht in der *KLAM-Stadt* enthalten sind, wurden über die *KLAM-Landschaft* ergänzt (ROLOFF & MEYER 2008):

- „Eher im Vorteil“ → Klasse 1
- „Indifferent“ → Klasse 2,
- „Eher im Nachteil“ → Klasse 4.

Klasse 3 wurde nicht zugewiesen, da *KLAM-Landschaft* nur drei Klassen verwendet. Auf diese Weise konnte 83 % der Einzelbäume im Baumkataster eine Eignung nach *KLAM-Stadt* oder *KLAM-Landschaft* zugeordnet werden. Baumarten, die nicht zugeordnet werden konnten, wurden nicht berücksichtigt. Im GIS wurden alle Bäume über eine räumliche Abfrage (*Select by location*) ausgewählt, die sich in der Ortslage Jenas plus 50 m Pufferbereich befinden und somit einem stadtklimatischen Einfluss ausgesetzt sind. Diese Auswahl wurde nachfolgend den statistischen Bezirken zugeordnet und die mittlere Eignung nach *KLAM-Stadt* im Bezirk bestimmt (*Spatial join* mit Auswertungsoption *Average*). Die Anzahl der Stadtbäume im statistischen Bezirk ergibt sich als Nebenprodukt dieser Operation (*Count*). Statistische Bezirke ohne Bäume im Baumkataster oder weniger als 10 Bäume wurden nicht betrachtet.



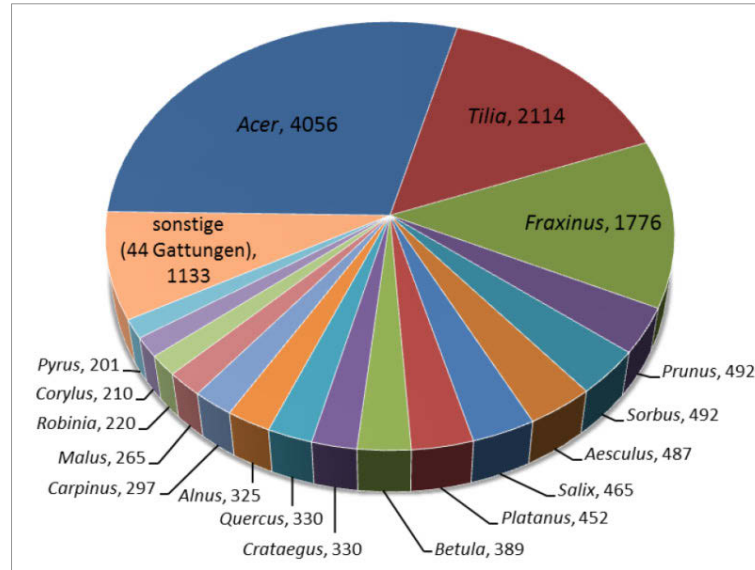


Abbildung 25: Anteile der Gattungen der Jenaer Stadtbäume, Stand Oktober 2014 (KNOPF 2016)

### 4.6.3 Klimawirkung der Gegenwart

#### *Teilklimawirkung Trockenstress auf Ackerflächen*

Die Klimawirkung für die Ackerflächen wurde aus den Variablen des Klimasignals, d. h. der KWB in der ackerbaulichen Vegetationsperiode, und der Sensitivität, d. h. des pflanzenverfügbaren Wassers in Form der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum und der Ackerflächengröße, ermittelt. Hierzu wurden die Variablen-Daten der statistischen Bezirke in der Tabellenkalkulation verarbeitet. Datenlücken traten nicht auf, jedoch besitzen nicht alle Bezirke Ackerflächen. Es folgten die Skalen-Transformation durch dekadischen Logarithmus und Normalisierung auf den Wertebereich [1,2] mittels Minimum-Maximum-Funktion. Die Aggregation zur Teilklimawirkung Trockenstress auf Ackerflächen in den statistischen Bezirken erfolgte linear, als arithmetisches Mittel der Variablen der Sensitivität, und geometrisch, als Produkt aus Klimasignal und Sensitivität. Die Gewichtung der Variablen und Indikatoren war jeweils gleichwertig. Folgende Rechenvorschriften wurden genutzt:

$$KS_{TAF} = KWB_{AVP} \quad (12)$$

$$ST_{TAF} = \frac{(PVW + AF)}{2} \quad (13)$$

$$KW_{TAF} = KS_{TAF} \times ST_{TAF} \quad (14)$$

mit

$KS_{TAF}$	=	Klimasignal des Trockenstresses auf Ackerflächen im statistischen Bezirk
$KWB_{AVP}$	=	Mittlere klimatische Wasserbilanz in der ackerbaulichen Vegetationsperiode für die Periode 1981-2010 im statistischen Bezirk
$ST_{TAF}$	=	Sensitivität bzgl. Trockenstresses auf Ackerflächen im statistischen Bezirk
$PVW$	=	Mittleres pflanzenverfügbares Wasser auf den Ackerflächen des statistischen Bezirks
$AF$	=	Ackerfläche im statistischen Bezirk
$KW_{TAF}$	=	Teilklimawirkung des Trockenstresses auf Ackerflächen im statistischen Bezirk

### ***Teilklimawirkung Trockenstress auf Waldflächen***

Die Teilklimawirkung für die Waldflächen wurde aus der KWB in der forstlichen Vegetationszeit als Klimasignal sowie mittlerer Eignung der Hauptbaumarten nach *KLAM-Wald* und Größe der Waldflächen im statistischen Bezirk als Sensitivitäten ermittelt. Der Arbeitsablauf ist mit dem der Teilklimawirkung Trockenstress auf Ackerflächen vergleichbar und spiegelt sich in den folgenden Gleichungen wieder:

$$KS_{TWF} = KWB_{FVZWF} \quad (15)$$

$$ST_{TWF} = \frac{(EKL_{WF} + WF)}{2} \quad (16)$$

$$KW_{TWF} = KS_{TWF} \times ST_{TWF} \quad (17)$$

mit

$KS_{TWF}$	=	Klimasignal des Trockenstresses für Waldflächen im statistischen Bezirk
$KWB_{FVZWF}$	=	Mittlere klimatische Wasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit für die Periode 1981-2010 auf Waldflächen im statistischen Bezirk
$ST_{TWF}$	=	Sensitivität bzgl. Trockenstresses für Waldflächen im statistischen Bezirk
$EKL_{WF}$	=	Mittlere Eignung der Hauptbaumarten nach <i>KLAM-Wald</i> auf den Waldflächen des statistischen Bezirks
$WF$	=	Waldfläche im statistischen Bezirk
$KW_{TWF}$	=	Teilklimawirkung des Trockenstresses auf Waldflächen im statistischen Bezirk

### ***Teilklimawirkung Trockenstress für Stadtbäume***

Für die Stadtbäume setzt sich die Teilklimawirkung des Trockenstresses aus der Anzahl der Stadtbäume im statistischen Bezirk und deren mittlerer Eignung nach *KLAM-Stadt* als Sensitivität sowie der KWB in der forstlichen Vegetationszeit als Klimasignal zusammen. Das Vorgehen entsprach dem der Teilklimawirkung Trockenstress auf Ackerflächen und kann anhand folgender Gleichungen nachvollzogen werden:

$$KS_{TSB} = KWB_{FVZOL} \quad (18)$$

$$ST_{TSB} = \frac{(EKL_{SB} + BZ)}{2} \quad (19)$$

$$KW_{TSB} = KS_{TSB} \times ST_{TSB} \quad (20)$$

mit

$KS_{TSB}$	=	Klimasignal des Trockenstress für Stadtbäume im statistischen Bezirk
$KWB_{FVZOL}$	=	Mittlere klimatische Wasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit für die Periode 1981-2010 in der Ortslage des statistischen Bezirks
$ST_{TSB}$	=	Sensitivität bzgl. Trockenstress für Stadtbäume im statistischen Bezirk
$EKL_{SB}$	=	Mittlere Eignung der Baumarten nach KLAM-Stadt in der Ortslage des statistischen Bezirks
$BZ$	=	Anzahl der Stadtbäume des städtischen Baumkatasters im statistischen Bezirk
$KW_{TSB}$	=	Klimawirkung des Trockenstress für Stadtbäume im statistischen Bezirk

### ***Gesamtklimawirkung Trockenstress für die Vegetation***

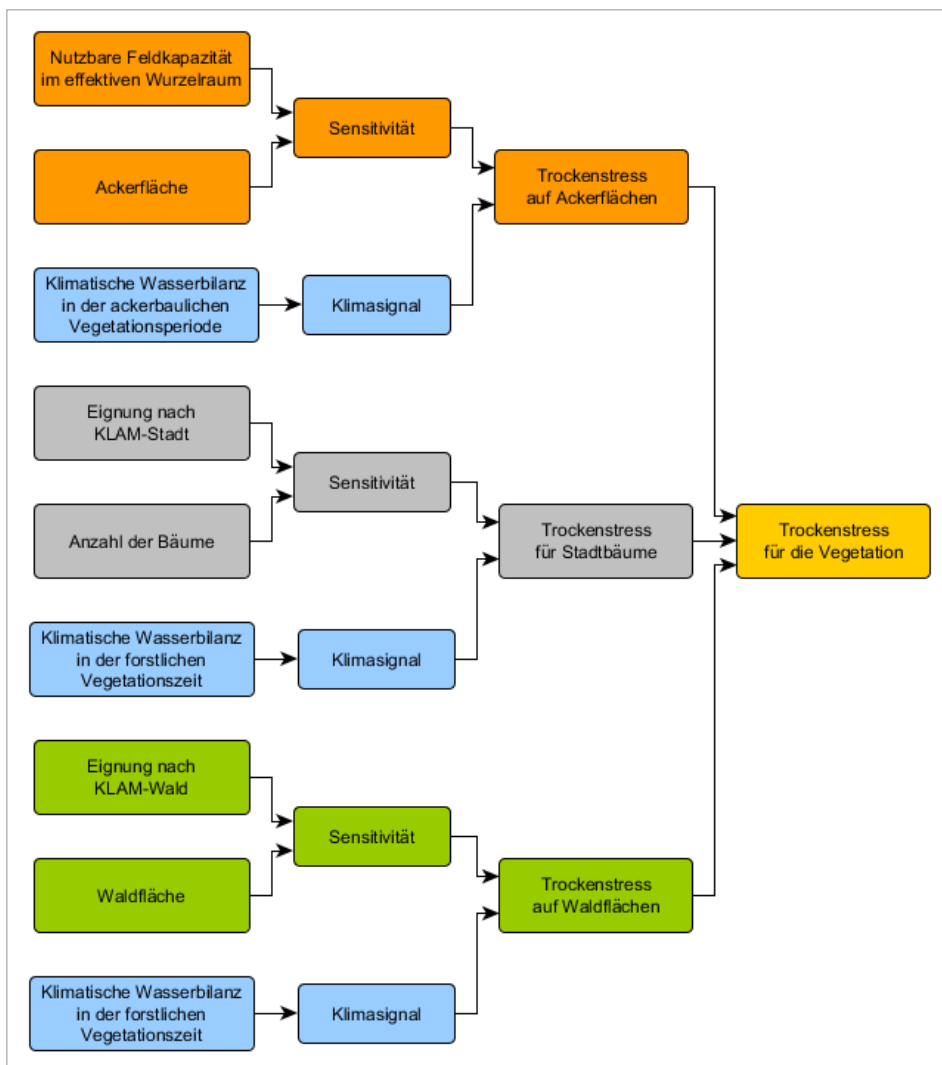
Die drei Teilklimawirkungen Trockenstress auf Ackerflächen, auf Waldflächen sowie für Stadtbäume werden zu einer Gesamtklimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* entsprechend Abbildung 26 (S. 86) aggregiert. Hierzu wird die in Kapitel 4.3.3 vorgestellte Methodik zur Gesamtklimawirkung auf die Teilklimawirkungen des Trockenstress angewendet. Dies heißt, dass sowohl die im statistischen Bezirk vorkommenden Teilklimawirkungen und deren Stärke, als auch die nicht vorkommenden Teilklimawirkungen im Sinne eines Vorteils bei der Gesamtbewertung berücksichtigt werden. Damit erhält der Bezirk, der jeweils starken Trockenstress auf Ackerflächen, auf Waldflächen und für Stadtbäume aufweist, die höchste, d. h. schlechteste, Bewertung und der Bezirk, der keine oder nur eine dieser Teilklimawirkungen aufweist, die geringste, d. h. beste, Bewertung. Zur Ableitung des Gesamtindikators Trockenstress wird in der Tabellenkalkulation für jeden Bezirk ein arithmetisches Mittel über alle Teilklimawirkungen im Stadtgebiet gebildet (absoluter Bezug) und ein arithmetisches Mittel über die im Bezirk auftretenden Teilklimawirkungen (relativer Bezug). Beide normalisierten Mittelwerte werden folgend wieder arithmetisch gemittelt und normalisiert. Es wird für jeden statistischen Bezirk ein Mittelwert aus absoluter und relativer Bewertung des Trockenstress wie folgt gebildet:

$$GKW_{TSV} = \frac{(AKW_{TSV} + RKW_{TSV})}{2} \quad (21)$$

$$GKW_{TSV} = \frac{\left( \frac{(KW_{TAF} + KW_{TWF} + KW_{TSB})}{3} + \frac{(KW_{T1} + \dots + KW_{Tn})}{n} \right)}{2} \quad (22)$$

mit

- $GKW_{TSV}$  = Gesamtklimawirkung des Trockenstresses für die Vegetation im statistischen Bezirk  
 $AKW_{TSV}$  = Absolute Klimawirkung des Trockenstresses für die Vegetation im statistischen Bezirk  
 $RKW_{TSV}$  = Relative Klimawirkung des Trockenstresses für die Vegetation im statistischen Bezirk  
 $KW_{TAF}$  = Teilklimawirkung des Trockenstresses auf Ackerflächen im statistischen Bezirk  
 (Wert ist 0,960 falls Teilklimawirkung nicht vorhanden ist; vgl. folgende Ausführungen)  
 $KW_{TWF}$  = Teilklimawirkung des Trockenstresses auf Waldflächen im statistischen Bezirk  
 (Wert ist 0,969 falls Teilklimawirkung nicht vorhanden ist; vgl. folgende Ausführungen)  
 $KW_{TSB}$  = Teilklimawirkung des Trockenstresses für Stadtbäume im statistischen Bezirk  
 (Wert ist 0,970 falls Teilklimawirkung nicht vorhanden ist; vgl. folgende Ausführungen)  
 $KW_{Tl}$  = Erste von maximal drei tatsächlich auftretenden Teilklimawirkungen des Trockenstresses im statistischen Bezirk  
 $KW_{Tn}$  = Letzte von maximal drei tatsächlich auftretenden Teilklimawirkungen des Trockenstresses im statistischen Bezirk



**Abbildung 26: Aggregation der Variablen, Indikatoren und Teilklimawirkungen zur Klimawirkung Trockenstress für die Vegetation (eigene Darstellung)**

Bei der Berechnung der absoluten Klimawirkung des Trockenstresses wird der Wert für eine nicht vorhandene Teilklimawirkung im statistischen Bezirk ersetzt. Hier war die Frage, welcher Wert einer nicht vorhandenen Klimawirkung entspricht. Null würde bei der Mittelwert-

bildung von Werten im Bereich [1,2] ein zu großes Gewicht ausüben. Eins würde eine Gleichsetzung von nicht vorhandener Klimawirkung und der niedrigsten vorhandenen Klimawirkung bedeuten, was unverhältnismäßig ist. Deshalb wurde ein Wert gewählt, der unterhalb des Wertes der geringsten Klimawirkung, d. h. eins, liegt und abhängig vom gewählten Wertebereich und der Anzahl der Teilräume des Untersuchungsgebiets mit vorhandener Teilklimawirkung ist und sich wie folgt berechnet:

$$KW_{NV} = SW_U - \frac{(SW_O - SW_U)}{(T - 1)} \quad (23)$$

mit

- $KW_{NV}$  = Substitutionswert für die Berechnung der absoluten Klimawirkung für statistische Bezirke ohne vorhandene Klimawirkung
- $SW_O$  = Obere Schranke des verwendeten Wertebereichs des Indikators, in diesem Fall 2
- $SW_U$  = Untere Schranke des verwendeten Wertebereichs des Indikators, in diesem Fall 1
- $T$  = Anzahl der Teilräume im Untersuchungsgebiet, die die betreffende Teilklimawirkung aufweisen

Auf diese Weise wurden folgende Werte für nicht vorhandene Teilklimawirkungen ermittelt, die als absolute Teilklimawirkung in Gleichung (22) eingesetzt würden: 0,960 für statistische Bezirke ohne Trockenstress auf Ackerflächen, 0,969 für statistische Bezirke ohne Trockenstress auf Waldflächen und 0,970 für statistische Bezirke ohne Trockenstress für Stadtbäume.

#### 4.6.4 Künftige Klimawirkung

Zur Beurteilung der Veränderung der Klimasignale der Teilklimawirkungen wird der *Climate change atlas* verwendet. Für den Trockenstress auf Ackerflächen wurde die KWB in der ackerbaulichen Vegetationsperiode genutzt, die diesmal durch die Zeitspanne März bis Oktober angenähert wurde. Für den Trockenstress auf Waldflächen und für Stadtbäume wurde die KWB in der forstlichen Vegetationszeit, angenähert als Monate April bis Oktober, verwendet. Zusätzlich wurde die maximale Länge von Trockenperioden (*Maximum length of dry spell*) untersucht, die jedoch nur für das Gesamtjahr vorlag.

Auch durch Veränderungen der Sensitivitäten von Acker- und Waldflächen sowie der Stadtbäume können Veränderungen in der künftigen Klimawirkung auftreten. Eine Veränderung der Sensitivität der Ackerflächen kann nur durch eine Veränderung der Bodeneigenschaften hervorgerufen werden. Aufgrund der sehr langsamen Bodenbildungsprozesse (SCHEFFER et al. 2010, STOCKMANN et al. 2014) werden die Bodeneigenschaften für den Betrachtungszeitraum

bis zum Ende des Jahrhunderts jedoch als konstant angenommen. Für die Waldflächen werden die Bodeneigenschaften ebenfalls als konstant angenommen. Für Stadtbäume indes können sich die Bodeneigenschaften am Standort vergleichsweise kurzfristig ändern. Der Ausbau von unterirdischen Leitungsinfrastrukturen und eine zunehmende Flächenversiegelung können die Wuchsbedingungen des einzelnen Baumes am Standort verschlechtern. Hier kann die Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche als Trendindikator dienen.

#### 4.7 Überschwemmungen durch Starkregen

Die Ausführungen zu den verschiedenen methodischen Ansätzen der Bestimmung von Auswirkungen lokaler Überschwemmungen haben gezeigt, dass Indikatorenansätze bei dynamischen Vorgängen wie Überschwemmungen und Sturzfluten an ihre Grenzen gelangen (vgl. Kapitel 2.6.3). Deshalb wird zur Bestimmung der Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* ein kombinierter Ansatz aus Wirkmodell und Indikatorenansatz verwendet. Während hydrologische Wirkmodelle zu vereinfachend im Ergebnis und hydraulische Wirkmodelle zu daten- und wissensintensiv für die kommunale Zielgruppe sind, erscheint ein Niederschlag-Abfluss-Modell mit vereinfachtem hydrodynamischen Ansatz wie *r.sim.water* als guter Kompromiss in Bezug auf Aussagequalität, Datenbedarf und Anwenderfreundlichkeit. Neben der 2D-Berechnung des Oberflächenabflusses, wie es für die Dynamik von Sturzfluten notwendig ist (ZOPPOU 2001), bietet es durch die bestehende Integration in ein Geoinformationssystem (*GRASS GIS*) mehr Flexibilität und Möglichkeiten bei der Datenvor- und Ergebnisaufbereitung (HOFIERKA & KNUTOVÁ 2015). Einschränkend muss gesagt werden, dass das Modell kein Kanalnetz berücksichtigt. Hierfür wird ein hydraulisches Modell benötigt.

In der Regel sind Niederschlag-Abfluss-Modell (Abflussbildung) und hydraulisches Modell (Abflussmodellierung) getrennt und aus unterschiedlichen Programmen bestehend. Für den vorliegenden Ansatz erfolgen alle Schritte der Überschwemmungsmodellierung im GIS: die Belastungsbildung (Niederschlagsinput) als Blockregen, die Abflussbildung mittels *curve number*-Verfahren und die Abflussmodellierung mit *r.sim.water*. Während das Wirkmodell für die Bestimmung der Variablen der Sensitivität eingesetzt wird, erfolgt die Verknüpfung mit dem Klimasignal zur Klimawirkung mittels eines Indikatorenansatzes. Dies wird notwendig, da die Wirkmodelle kein Klimasignal im Sinne der Vulnerabilitätsbewertung integrieren. Die Analyse wurde mit den Geoinformationssystemen *ESRI ArcGIS* und *GRASS GIS* sowie der Tabellenkalkulation *Microsoft Excel* durchgeführt. Kursive Begriffe in Klammern verweisen in der Methodenbeschreibung auf die verwendeten GIS-Funktionen.

#### 4.7.1 Klimasignal

Als Indikator für das Klimasignal wird das Sturzflutpotenzial verwendet. Das Sturzflutpotenzial wurde thüringenweit aus Radardaten des DWD (RZ-Produkt) im Rahmen des Forschungsprojekts „Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen“ von Thüringer Klimaagentur, Goethe-Universität Frankfurt/Main und DWD abgeleitet. BRENDL et al. (2014) berechnen das Sturzflutpotenzial als Summe der Quotienten aus Niederschlagsintensität und Verlagerungsgeschwindigkeit eines konvektiven Zellkerns. Dabei werden nur Zellkerne von konvektiven Zellen berücksichtigt, die eine Niederschlagsintensität von mindestens 20 mm/h erreichen. Das Sturzflutpotenzial ist besser geeignet als eine einzelne Niederschlagssumme oder eine Auftrittshäufigkeit von z. B. Starkregentagen, da es neben der Niederschlagsintensität anhand der Verlagerungsgeschwindigkeit der Starkniederschlagszelle auch die Information enthält, wie intensiv sich der Niederschlag über einem Gebiet potenziell abregnet. Da konvektive Wetterlagen vor allem in den Sommermonaten auftreten und für starke Regenereignisse sorgen, wurde der jährliche Untersuchungszeitraum des Forschungsprojektes auf die Monate April bis September eingegrenzt. Ein Nachteil des Sturzflutpotenzials, wie auch der anderen Ergebnisse des Projektes, ist der bisher kurze Betrachtungszeitraum. Da das RZ-Produkt erst seit 2004 vom DWD bereitgestellt wird, beschränken sich die Aussagen auf den Zeitraum 2004-2010. Es handelt sich beim Sturzflutpotenzial somit nicht um ein „echtes Klimasignal“ mit einem Betrachtungszeitraum von 30 oder mehr Jahren. Trotzdem wird es aufgrund seiner thematischen Aussagekraft hier als Klimasignal eingesetzt. Durch die Fortschreibung des Produkts steigt die Belastbarkeit kontinuierlich. Die Rasterdaten zum Sturzflutpotenzial wurden von der Thüringer Klimaagentur bereitgestellt. Die Flächenmittel für die statistischen Bezirke wurden im GIS ermittelt (*Zonal statistics as table*).

#### 4.7.2 Sensitivität

Die Sensitivität wird durch die flächenmäßige Ausdehnung der Überschwemmung und die durchschnittliche Überflutungshöhe in einem statistischen Bezirk charakterisiert. Zur Bestimmung dieser Größen wird eine Überschwemmungsmodellierung mit dem in *GRASS GIS* implementierten Modul *r.sim.water* durchgeführt. Dazu werden als Eingangsdaten ein hochaufgelöstes Geländemodell (DGM), eine Rasterkarte der Oberflächenrauigkeit (Manning-Werte) und der Effektivniederschlag benötigt.

### ***Oberflächenmodell***

Das verwendete DGM hat eine Auflösung von 2 m und wurde durch das Thüringer Landesamt für Vermessung und Geoinformation (TLVermGeo) bereitgestellt. Es wurde in den Jahren 2010-2014 durch *Airborne Laserscanning* erstellt und ist das für Thüringen am höchsten räumlich aufgelöste DGM. Das Geländemodell ist von Bebauung und Bewuchs (Wald) bereinigt und stellt die Reliefoberfläche dar. Für die Überschwemmungsmodellierung sind die städtischen Strukturen jedoch wichtig, da das Wasser um die Häuser herum fließt. Deshalb wurde zusätzlich ein 3D-Gebäudemodell (*LoDI*) vom TLVermGeo bezogen. Das 3D-Gebäudemodell wurde in ein 2D-Shapefile umgewandelt (*Multipatch footprint*). Es enthält als Attribut die Gebäudehöhe mit einer Genauigkeit von 10 cm. Das Shapefile wurde editiert und größere Hausdurchgänge und Hausdurchfahrten ausgeschnitten, wie z. B. die Durchgänge um den Ernst-Abbe-Platz/Uni-Campus und die Durchfahrt Unterm Markt/Ecke Unterlauengasse, da diese Durchgänge Fließwege darstellen. Das 2D-Shapefile der Gebäude wurde anschließend in ein DGM mit 2 m Auflösung konvertiert (*Polygon to raster*), wobei die z-Komponente des DGM durch die Gebäudehöhe repräsentiert wird. Das Oberflächenmodell für die Überschwemmungsmodellierung ergab sich dann als Summe aus DGM und Gebäude-DGM (*Raster calculator*) für das Stadtgebiet plus 250 m Pufferbereich (*Extract by mask*).

### ***Oberflächenrauigkeit***

Für die Oberflächenrauigkeit wird in *r.sim.water* der Rauheitsbeiwert nach Manning verwendet. Die empirisch ermittelten Werte wurden der Literatur entnommen (MANIAK 2010, USDA 2010, MATEI 2012) und den Landnutzungen im Stadtgebiet Jena (*ATKIS-Basis-DLM*) zugeordnet. Für Landnutzungen, für die keine Werte aus der Literatur zugeordnet werden konnten, wurde ein Mittelwert ähnlicher Landnutzungen verwendet. Der Vektordatensatz mit den *ATKIS*-Landnutzungen und zugewiesenen Manning-Werten wurde in ein Raster mit 2 m Auflösung umgewandelt (*Polygon to raster*).

### ***Effektiver Niederschlag***

Die Ermittlung des effektiven Niederschlags, also des zum Abfluss kommenden Niederschlags, erfolgte mittels *Runoff Curve Number Method* (DVWK 1984, 1991, USDA 1986). Die *curve number* (CN) beschreibt die Infiltrationskapazität bzw. den zum Abfluss kommenden Niederschlag und ist abhängig von Bodenart, Bodennutzung, Vorregen und Jahreszeit. Zuerst wurde den im Stadtgebiet vorkommenden Leitbodenformen, auf Basis der bodengeo-



logischen Übersichtskarte Thüringen im Maßstab 1:100.000, einer der vier, in der Methode unterschiedenen, hydrologischen Bodentypen nach TLUG (2009) zugeordnet.

Die *Runoff Curve Number Method* unterscheidet drei Bodenfeuchteklassen in Abhängigkeit des Vorregens der letzten fünf Tage und der Jahreszeit. Im Allgemeinen wird die mittlere Bodenfeuchteklasse, Klasse II, verwendet (DVWK 1991). Für die Untersuchung wurde die passende Bodenfeuchteklasse aus den Niederschlagsdaten der DWD-Station Jena-Sternwarte in der Tabellenkalkulation ermittelt. Hierzu wurde die Niederschlagssumme der fünf Tage vor einem Extremregenereignis (vgl. Kapitel 4.4) in Abhängigkeit der Jahreszeit nach DVWK (1991) ausgewertet. Dabei konnten die Bedingungen für die Bodenfeuchteklasse II bestätigt werden und die *CN*-Werte für diese Klasse den Landnutzungen (*ATKIS-Basis-DLM*) für alle vier hydrologischen Bodentypen aus der Literatur im GIS zugewiesen werden (USDA 1986, DVWK 1991, VOGES 1999, RIEDEL 2004, MANIAK 2010, WEHMEYER et al. 2011).

Es folgte die räumliche Überlagerung der Leitbodenformen, inkl. des zugeordnetem hydrologischen Bodentyps, und der *ATKIS*-Landnutzungsklassen, inkl. der *CN*-Werte für die vier hydrologischen Bodentypen (*Intersect*). Die *curve number* ergab sich für jede Fläche in Abhängigkeit der Landnutzung und des hydrologischem Bodentyps. Der Vektordatensatz mit den *CN*-Werten wurde dann in ein Raster mit 2 m Auflösung konvertiert (*Polygon to raster*).

Der effektive Niederschlag  $Q$  ergibt sich nach USDA (1986), wie in Gleichung (24) dargestellt. Für die Rückhaltemenge  $S$  gilt nach CASTRO et al. (2008b) und TYRNA & HOCHSCHILD (2010b) die Gleichung (25). Der Anfangsverlust  $I$  wird in Anlehnung an DVWK (1991) anstatt der Variante des USDA (1986) realistischer durch Gleichung (26) beschrieben. Durch Einsetzen der Gleichungen (25) und (26) in Gleichung (24) ergibt sich schließlich nach Umformung (CASTRO et al. 2008b, TYRNA & HOCHSCHILD 2010b) Gleichung (27).

$$Q = \frac{(P - I)^2}{(P - I) + S} \quad (24)$$

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254 \quad (25)$$

$$I = 0,05 \times S \quad (26)$$

$$Q = \frac{\left(P - 0,05 \times \left(\frac{25.400}{CN} - 254\right)\right)^2}{P + 0,95 \times \left(\frac{25.400}{CN} - 254\right)} = \frac{\left(P - \frac{1.270}{CN} + 12,7\right)^2}{P + \frac{24.130}{CN} - 241,3} \quad (27)$$

mit

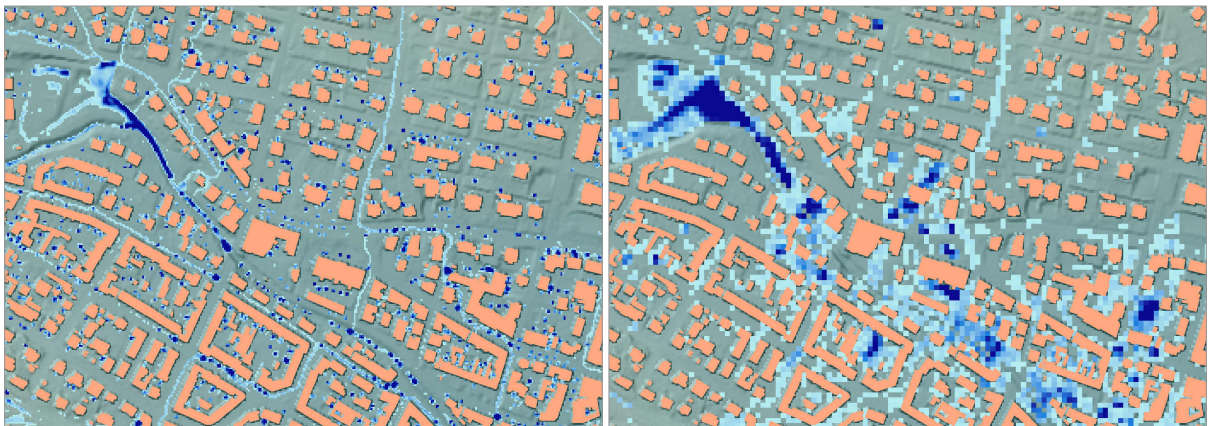
- $Q$  = Effektiver Niederschlag
- $P$  = Gebietsniederschlag
- $I$  = Anfangsverlust vor Beginn des Abflusses
- $S$  = Potenzielle maximale Rückhaltmenge
- $CN$  = Curve number

Der Gebietsniederschlag  $P$  wird mit 24,4 mm angesetzt. Dies entspricht dem 99. Perzentil der Tagesniederschlagssumme der Regentage für die Periode 1981-2010 und einer Auftretshäufigkeit von knapp zweimal pro Jahr, was der Definition eines Starkregenereignisses nach DIN (1994) genügt. Wird diese Tagesniederschlagssumme als einziges Ereignis des Tages auf eine Dauer von 60 min bezogen, entspricht dies dem 99,99. Perzentil der Niederschlagssumme der Stunden mit Regen im Sommerhalbjahr (April bis September) der zur Verfügung stehenden stündlichen Regendaten der DWD-Station Jena-Sternwarte für den Zeitraum 2004-2015. Ein derartiges Ereignis würde nur 0,09-mal im Jahr in Jena auftreten und hätte eine Wiederkehrzeit von etwa elf Jahren. Der DWD (2016b) spricht bei 25 mm in 60 min von einem heftigen Starkregen mit Unwetterwarnung. Ein Niederschlag von 24,4 mm in 60 min ist somit geeignet eine Überschwemmung durch ein Starkniederschlagsereignis auszulösen. Der Niederschlag wird weiterhin als flächendeckender Blockregen angenommen, um Abflüsse und Überschwemmungen im gesamten Stadtgebiet hervorzurufen. Der Effektivniederschlag  $Q$  wird durch Verrechnung der Rasterdatensätze für die *Curve number* und den Gebietsniederschlag  $P$  nach Gleichung (27) als Rasterdatensatz mit einer Auflösung von 2 m erzeugt (*Raster calculator*).

### Überschwemmungsflächen

Vor der Überschwemmungsmodellierung in *GRASS GIS* wurde das Oberflächenmodell, bestehend aus DGM und Bebauung, einer Vorprozessierung unterzogen (*ArcHydro-Tools*). Hier wurden Artefakte wie kleine abflusslose Rasterzellen (*Sinks*) im DGM bereinigt (*Sink prescreening*, *Sink evaluation*, *Sink selection*, *Fill sinks*). Es wurden nur *Sinks* mit weniger als 100 m<sup>2</sup> Einzugsgebiet gefüllt, um größere natürliche Mulden, in denen sich Regenwasser sammeln würde, zu erhalten.

Die Überschwemmungsmodellierung wurde anschließend mit dem Modul *r.sim.water* in *GRASS GIS 7.0.1* (x64) unter Ubuntu 14 durchgeführt. Die Linux-Version wurde gewählt, da die 64-Bit-Unterstützung für Windows noch nicht umgesetzt ist. Als Eingangsdaten für das Modell wurden, neben den oben beschriebenen Datensätzen, auch die partiellen Ableitungen des Oberflächenmodells (dx, dy) benötigt. Diese lassen sich direkt in *GRASS GIS* aus dem Oberflächenmodell berechnen (*r.slope.aspect*). Die Simulation wurde mit 2 m Auflösung für 120 min begonnen, mit Ausgabeschritten von 15 min. Das Modellgebiet ist 48.556.000 Zellen groß und beinhaltet als Standard das Zweifache der Zellenzahl an Partikeln (97.112.000), die die Wasserpakete repräsentieren. Das Modell brach trotz aktuellen Rechners relativ schnell ab. Nachfolgend wurden die Analyseauflösung und die Anzahl der Partikel bis zu einer stabilen Konfiguration reduziert. Dies war eine Auflösung von 6 m mit 5.396.666 Zellen und 4.600.000 Wasser-Partikeln. Die Simulation lief etwa 7,5 Stunden. Testweise wurde ein kleinerer Innenstadtbereich mit 2 m Auflösung modelliert (1.843.266 Zellen, 3.686.532 Wasser-Partikel, 6,5 Stunden). Den Vergleich beider Modellierungen zeigt Abbildung 27. Dabei wird klar, wie stark das Ergebnis von der Analyse-Auflösung abhängt. Die Überschwemmungsflächen sind bei geringerer räumlicher Auflösung (6 m) größer als bei einer Modellierung mit hoher Auflösung (2 m). Demnach ist *r.sim.water* für eine Überschwemmungsmodellierung größerer Stadtgebiete unter Verwendung von normalen Desktoprechnern nur eingeschränkt geeignet. Für die Modellierung von Überschwemmungen infolge räumlich begrenzter Starkniederschläge in einzelnen Quartieren oder Stadtteilen ist die Methode jedoch gut geeignet, wie viele Studien belegen (HOFIERKA et al. 2002, CASTRO et al. 2008b, TYRNA & HOCHSCHILD 2010a, 2010b, ALLE et al. 2011, RPD-AAU 2012, HOFIERKA & KNUTOVÁ 2015). Trotzdem ist die Aussagekraft der Modellierung mit vorliegender Auflösung von 6 m als höher anzusehen als die Ergebnisse von Indikatoransätzen.



**Abbildung 27:** Überschwemmungsmodellierung mit *r.sim.water*. Durchgeführt unter *GRASS GIS 7.0.1* mit einer Auflösung von 2 m (links) bzw. 6 m (rechts), Darstellung ab 1 cm Überflutungshöhe (eigene Darstellung)

Das Ergebnisraster der Überflutungshöhe wurde für den Zeitschritt 60 min exportiert, d. h. die Überschwemmungsflächen geben den Zustand nach einem einstündigen Regen von 24,4 mm wieder. In *ArcGIS* wurden die Überschwemmungshöhen kleiner 1 cm entfernt (*Raster Calculator*). Zudem wurde das Raster der Überschwemmungshöhen auf die Ortslage begrenzt und die Gebäudegrundrisse und Fließgewässer ausgeschnitten (*Extract by mask*), da Wasser auf Dächern der Kanalisation zugeführt wird und Wasser in Vorflutern als positiv im Sinne der Abführung des Regenwassers zu sehen ist. Letztlich ergaben sich die Variablen der Sensitivität, die überschwemmte Fläche und die durchschnittliche Überflutungshöhe im statistischen Bezirk, durch die statistische Auswertung des Rasters (*Zonal statistics as table*).

#### 4.7.3 Klimawirkung der Gegenwart

Die Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* wurde aus den Indikatoren zur Sensitivität, mit den zwei Variablen überschwemmte Fläche und durchschnittliche Überflutungshöhe, und zum Klimasignal, in Form des Sturzflutpotenzials, ermittelt. Abbildung 28 (S. 95) zeigt die Aggregation der Variablen und Indikatoren zur Klimawirkung. Die im GIS ermittelten Bezirksstatistiken wurden in der Tabellenkalkulation weiterverarbeitet: Skalen-Transformation durch dekadischen Logarithmus und Normalisierung auf den Wertebereich [1,2] mittels Minimum-Maximum-Funktion für die einzelnen Variablen. Die Aggregation der zwei Variablen der Sensitivität erfolgte linear als arithmetisches Mittel, die Aggregation zur Klimawirkung geometrisch als Produkt aus Klimasignal und Sensitivität. Die Gewichtung war jeweils gleichwertig. Folgende Rechenvorschriften wurden genutzt:

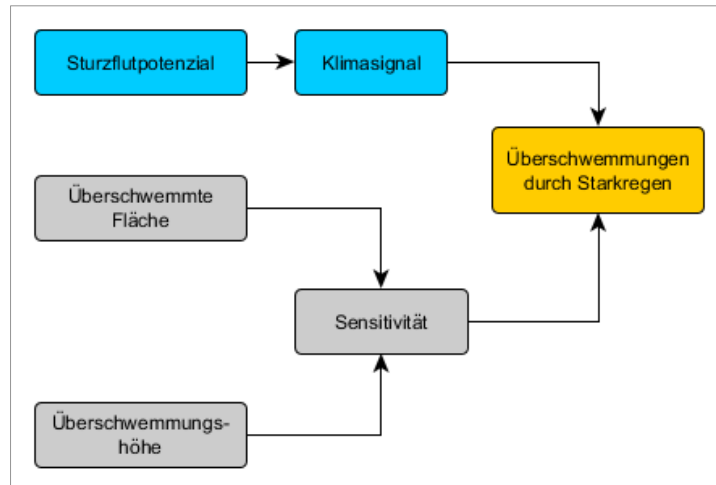
$$KS_{USR} = SFP \quad (28)$$

$$ST_{USR} = \frac{(UF + UH)}{2} \quad (29)$$

$$KW_{USR} = KS_{USR} \times ST_{USR} \quad (30)$$

mit

- $KS_{USR}$  = Klimasignal der Überschwemmungen durch Starkregen im statistischen Bezirk
- $SFP$  = Mittleres Sturzflutpotenzial für das Sommerhalbjahr (April bis September) im Zeitraum 2004-2010 im statistischen Bezirk
- $ST_{USR}$  = Sensitivität bzgl. Überschwemmungen durch Starkregen im statistischen Bezirk
- $UF$  = Überschwemmte Fläche mit einer Überflutungshöhe größer 1 cm in der Ortslage des statistischen Bezirks
- $UH$  = Durchschnittliche Überflutungshöhe von überschwemmten Flächen mit einer Überflutungshöhe größer 1 cm im statistischen Bezirk
- $KW_{USR}$  = Klimawirkung der Überschwemmungen durch Starkregen im statistischen Bezirk



**Abbildung 28: Aggregation der Variablen und Indikatoren zur Klimawirkung Überschwemmungen durch Starkregen (eigene Darstellung)**

Zur Validierung der Ergebnisse der Klimawirkung wurden Feuerwehreinsatzdaten der Jahre 2009-2013 analysiert. Aus den Einsätzen der Berufsfeuerwehr wurden in der Tabellenkalkulation alle Einsätze herausgefiltert, deren Einsatzbeschreibung auf Überschwemmungen hindeuten, wie z. B. „Keller unter Wasser“, „Kanaldeckel rausgedrückt“ oder „Straße unter Wasser“, und die in zeitlicher Nähe zu Starkregenereignissen liegen. Es konnten 70 Einsätze zu 16 Starkregenereignissen zugeordnet und den statistischen Bezirken zugewiesen werden.

#### 4.7.4 Künftige Klimawirkung

Zur Beurteilung der Entwicklung des in der Arbeit verwendeten Sturzflutpotenzials können die Ergebnisse des Thüringer Projektes zum konvektiven Unwetterpotenzial herangezogen werden (BRENDL et al. 2014). Zusätzlich wurde die Veränderung des Klimasignals anhand der Aussagen des *Climate change atlas* beurteilt. Hierfür wird die Veränderung der mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit einem Niederschlag größer 20 mm zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 ausgewertet. Für Jena entsprechen 20 mm etwa dem 98. Perzentil der Tagesniederschlagssumme der Regentage in der Klimaperiode 1981-2010. Eine jahreszeitliche Differenzierung der Aussagen des *Climate change atlas* für das Sommerhalbjahr ist für die verwendete Variable nicht möglich. Als weitere Variable wurde die Veränderung der mittleren jährlichen Niederschlagssumme aller Tage mit einem Niederschlag über dem 99. Perzentil zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 analysiert.

Die Sensitivität innerhalb der Klimawirkung wird über die flächenmäßige Ausdehnung der Überschwemmung und die durchschnittliche Überflutungshöhe in einem statistischen Bezirk charakterisiert. Eine mögliche künftige Veränderung der Sensitivität ist demnach an eine Ver-

änderung von Relief oder Landnutzung gebunden, wovon nur letztere realistisch ist. Die Anpassung der Kanalnetze an sich verändernde Niederschlagsverhältnisse ist Teil der Anpassungskapazität, da hier die Abführung des oberflächlichen Abflusses im Vordergrund steht und nicht die Minderung der Entstehung des selbigen. Die Anpassungskapazität wird in der Arbeit jedoch nicht betrachtet (vgl. Kapitel 4.2). Damit weniger Oberflächenabfluss bei Starkniederschlagsereignissen entsteht, müssten veränderte Flächennutzungen eine bessere Versickerung von Niederschlagswasser ermöglichen, was vor allem durch Entsiegelung erreicht werden kann. Daher wird die Entwicklung der Flächenversiegelung in Form der Siedlungs- und Verkehrsfläche zur Abschätzung der Veränderung der Sensitivität herangezogen.

#### 4.8 Gesamtklimawirkung

Die Ergebnisse zu den Klimawirkungen in den statistischen Bezirken Jena können bereits einzeln und zur ersten räumlichen Verortung von Anpassungsmaßnahmen genutzt werden. Um Aussagen zur Gesamtklimawirkung treffen zu können, bedarf es einer weiteren Aggregation der Ergebnisse. Ziel ist ein Indikator zur Bewertung der Gesamtklimawirkung, der auch erweitert werden kann, sollten später Ergebnisse zu weiteren Klimawirkungen vorliegen. Ein Beispiel dafür geben SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING (2013) auf Landkreis-Ebene.

In Kapitel 4.3.3 wurde die Bildung des Indikators zur Gesamtklimawirkung bereits kurz erläutert und in Kapitel 4.6.3 auf die Gesamtklimawirkung des *Trockenstresses für die Vegetation* angewendet. Dabei wurde deutlich, dass es zwei Perspektiven für die Aggregation zu einer Gesamtklimawirkung gibt, die als absolute bzw. relative Perspektive bezeichnet werden kann. Die absolute Perspektive bedeutet, dass alle im Stadtgebiet Jena vorkommenden Klimawirkungen in die Bewertung eines statistischen Bezirks einfließen. Dabei werden auch Klimawirkungen einbezogen, die nicht im statistischen Bezirk vorkommen. Dies wird im Sinne eines Vorteils gewertet, was sich in einem niedrigeren Indikatorwert der Gesamtklimawirkung niederschlägt. Dieses Vorgehen entspricht der Perspektive einer übergeordneten strategischen Planung, wie z. B. Stadtverwaltung, Regionalplanung oder Landesverwaltung, und der Frage: Welcher Teilraum ist am stärksten durch die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Klimawirkungen betroffen? Dem gegenüber steht die relative Perspektive der Verwaltung und Akteure eines untergeordneten Teilraums, wie z. B. Ortsteil, Gemeinde oder Landkreis, deren Fokus zuerst auf dem eigenen Teilraum liegt: Welche Klimawirkungen sind für meinen Teilraum relevant; durch was bin ich vom Klimawandel betroffen? Dementsprechend werden nur die Klimawirkungen betrachtet, die in dem Teilraum auftreten.

In der Arbeit wird eine kombinierte Bewertung aus absoluter und relativer Perspektive angewendet. Dieser methodische Ansatz ist bisher in der Praxis der Klimaanpassung nicht verwendet worden. Lediglich SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING (2013) und BUTH et al. (2015) nutzten die Verknüpfung absoluter und relativer Werte, jedoch zur besseren Bewertung von Sensitivitätsvariablen und nicht auf Ebene der Klimawirkungen (vgl. Kapitel 4.3.3). Bei der kombinierten Bewertung werden statistische Bezirke am höchsten, d. h. schlechtesten, eingestuft, die eine hohe absolute Gesamtklimawirkung besitzen, d. h. viele unterschiedliche Klimawirkungen aufweisen und gleichzeitig eine hohe relative Gesamtklimawirkung zeigen, d. h. bei ihren vorhandenen Klimawirkungen im Vergleich zu anderen Teilräumen hohe Werte aufweisen. Es schneiden somit die Teilräume am höchsten bzw. schlechtesten ab, die die meisten Klimawirkungen auf sich vereinen und zudem die höchsten bzw. schlechtesten Bewertungen bei diesen Klimawirkungen erzielen.

Die absolute Gesamtklimawirkung eines statistischen Bezirks ergibt sich aus allen im Stadtgebiet Jena vorkommenden Klimawirkungen. Hierzu wurden die normalisierten Werte der einzelnen Klimawirkungen in die Tabellenkalkulation *Excel* geladen, linear aggregiert, arithmetisch gemittelt und wieder auf den Wertebereich [1,2] normalisiert (SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING 2013, TATE 2013, vgl. Kapitel 4.3.3):

$$AGKW = \left( \frac{AKW_1 + AKW_2 + \dots + AKW_m}{m} \right) \quad (31)$$

$$AGKW = \frac{(KW_{WBB} + AKW_{TSV} + KW_{USR})}{3} \quad (32)$$

mit

$AGKW$	=	Absolute Gesamtklimawirkung im statistischen Bezirk
$AGKW_{1..m}$	=	Absolute Klimawirkungen im statistischen Bezirk
$KW_{WBB}$	=	Klimawirkung der Wärmebelastung für die Bevölkerung im statistischen Bezirk
$AKW_{TSV}$	=	Absolute Klimawirkung des Trockenstresses für die Vegetation im statistischen Bezirk
$KW_{USR}$	=	Klimawirkung der Überschwemmungen durch Starkregen im statistischen Bezirk

Hierbei ist zu beachten, dass sich die Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* selbst aus Teilklimawirkungen zusammensetzt. Für diese Klimawirkung existieren somit bereits eine absolute und eine relative Komponente, so dass in Gleichung (32) nicht die Gesamtklimawirkung des *Trockenstresses für die Vegetation* ( $GKW_{TSV}$ ) eingesetzt wird, sondern die absolute Klimawirkung des Trockenstresses ( $AKW_{TSV}$ ; vgl. Gleichungen (21) und (22) in Kapitel 4.6.3). Die untersuchten Klimawirkungen *Wärmebelastung für die Bevölkerung*, *Trocken-*

*stress für die Vegetation* und *Überschwemmungen durch Starkregen* treten in allen statistischen Bezirken Jenas auf. Treten im statistischen Bezirk einzelne Klimawirkungen nicht auf, würde zur Ermittlung der absoluten Gesamtklimawirkung ein Substitutionswert entsprechend der Ausführungen in Kapitel 4.6.3 eingesetzt.

Die relative Gesamtklimawirkung ergibt sich aus den tatsächlich im statistischen Bezirk auftretenden Klimawirkungen. Dabei werden die normalisierten Werte der Klimawirkungen aggregiert, gemittelt und normalisiert (SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING 2013, TATE 2013, vgl. Kapitel 4.3.3):

$$RGKW = \left( \frac{RKW_1 + RKW_2 + \dots + RKW_n}{n} \right) \quad (33)$$

$$RGKW = \frac{(KW_{WBB} + RKW_{TSV} + KW_{USR})}{3} \quad (34)$$

mit

$RGKW$	=	Relative Gesamtklimawirkung im statistischen Bezirk
$RGKW_{1..n}$	=	Relative Klimawirkungen im statistischen Bezirk
$KW_{WBB}$	=	Klimawirkung der Wärmebelastung für die Bevölkerung im statistischen Bezirk
$RKW_{TSV}$	=	Relative Klimawirkung des Trockenstresses für die Vegetation im statistischen Bezirk
$KW_{USR}$	=	Klimawirkung der Überschwemmungen durch Starkregen im statistischen Bezirk

Hier wird die relative Klimawirkung des *Trockenstresses für die Vegetation* ( $RKW_{TSV}$ ) im statistischen Bezirk verwendet. Für die Klimawirkungen *Wärmebelastung für die Bevölkerung* und *Überschwemmungen durch Starkregen* wird, wie in Gleichung (32), der normale Indikatorwert verwendet, da diese Klimawirkungen nicht aus einzelnen Teilklimawirkungen zusammengesetzt sind und somit auch keine absoluten und relativen Komponenten aufweisen.

Die kombinierte Gesamtklimawirkung im statistischen Bezirk als abschließender Indikator ergibt sich als arithmetisches Mittel der normalisierten absoluten und relativen Gesamtklimawirkung (vgl. Kapitel 4.3.3):

$$KGKW = \frac{(AGKW + RGKW)}{2} \quad (35)$$

mit

$KGKW$	=	Kombinierte Gesamtklimawirkung im statistischen Bezirk
$AGKW$	=	Absolute Gesamtklimawirkung im statistischen Bezirk
$RGKW$	=	Relative Gesamtklimawirkung im statistischen Bezirk



Der Indikatorwert wird anschließend wieder per Min-Max-Verfahren auf den Wertebereich [1,2] normalisiert und nach Standardabweichung klassifiziert und dargestellt.

## **4.9 Planungshinweise zur Klimaanpassung**

### **4.9.1 Datenaufbereitung**

Für die zuvor untersuchten Klimawirkungen werden Planungshinweise abgeleitet, damit Stadtplaner mittels raumplanerischer Instrumente Anpassungsmaßnahmen, z. B. in Flächennutzungs- und Bebauungsplänen, verankern können. Die kartografische Darstellung von flächen- und punkthaften Planungshinweisen erfordert das Verlassen der Betrachtungsebene der statistischen Bezirke der vorangegangenen Kapitel. Für die Aufbereitung der Klimawirkungen auf Ebene konkreter Flächen wurden die gleichen Methoden wie in den Kapiteln 4.5, 4.6 und 4.7 angewendet, jedoch keine Flächenmittel auf Ebene der statistischen Bezirke gebildet. Die Basisdaten der Klimasignale und Sensitivitäten werden in ihrer ursprünglichen Auflösung verwendet und zusätzliche Informationsebenen der Karte beigelegt. Die Analyse wurde mit der Standardsoftware *ESRI ArcGIS* und *Microsoft Excel* durchgeführt. Kursive Begriffe in Klammern verweisen in der Methodenbeschreibung auf die verwendeten *ArcGIS*-Funktionen.

#### ***Wärmebelastung für die Bevölkerung***

Als Klimasignal diene die mittlere jährliche Anzahl Heißer Tage für die Klimaperiode 1981-2010 (vgl. Kapitel 4.5.1), das durch logarithmische Skalen-Transformation und Normalisierung mittels Minimum-Maximum-Funktion umgeformt wurde. Zur Bestimmung des Wärmeinseleffektes wurde der Vektordatensatz zur Flächenversiegelung genutzt und die vier Variablen Versiegelungsgrad, Größe der versiegelten Fläche, Naturferne und Fragmentierungsgrad für jede Polygonfläche im GIS berechnet und anschließend skalentransformiert und normalisiert (*Calculate geometry*). Der Wärmeinseleffekt ergab sich nachfolgend als normalisiertes arithmetisches Mittel der vier normalisierten Variablen. Für die hitzesensitive Bevölkerung liegen nur Daten auf Ebene der statistischen Bezirke vor. Somit wurde die ursprüngliche Tabelle mit allen Variablen direkt übernommen und räumlich mit den statistischen Bezirken verknüpft (*Table join*). Für die Klimawirkung wurden die drei Vektordatensätze zum Klimasignal, dem Wärmeinseleffekt und der hitzesensitiven Bevölkerung im GIS räumlich überlagert (*Intersect*) und für alle Polygonflächen das Klimasignal, die Sensitivität und die Klimawirkung entsprechend der Gleichungen (9), (10) und (11) (vgl. Kapitel 4.5.3) berechnet.

### ***Trockenstress für die Vegetation***

Bei der Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* wurden, wie bei der Betrachtung der statistischen Bezirke, die Teilklimawirkungen für Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume getrennt bearbeitet und zur Gesamtklimawirkung aggregiert.

Für die Teilklimawirkung des Trockenstresses auf Ackerflächen wurde als Klimasignal die KWB in der ackerbaulichen thermischen Vegetationsperiode genutzt, als Sensitivität die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (vgl. Kapitel 4.6.1, 4.6.2). Beide Variablen wurden durch logarithmische Skalen-Transformation und Normalisierung mittels Minimum-Maximum-Funktion umgeformt und die Vektordatensätze anschließend räumlich überlagert (*Intersect*). Die Teilklimawirkung ergab sich für jede Polygonfläche durch Multiplikation der Indikatoren Klimasignal und Sensitivität entsprechend Gleichung (14) (vgl. Kapitel 4.6.3).

Die Teilklimawirkung des Trockenstresses auf Waldflächen wurde auf Basis der KWB in der forstlichen Vegetationszeit (Klimasignal) und der Eignung der Hauptbaumart der jeweiligen Waldfläche nach *KLAM-Wald* (Sensitivität) ermittelt (vgl. Kapitel 4.6.1, 4.6.2). Die Indikatoren Klimasignal und Sensitivität wurden skalentransformiert und normalisiert und nach Überlagerung der Vektordatensätze (*Intersect*) nach Gleichung (17) multiplikativ zur Teilklimawirkung verknüpft (vgl. Kapitel 4.6.3).

Auf Ebene der konkreten Flächen wurde im Gegensatz zur Betrachtung auf der Ebene der statistischen Bezirke die Flächengröße der Acker- und Waldflächen nicht in die Wertung einbezogen (vgl. Gleichungen (13) und (16)), da die Aggregation auf einer höheren Ebene, wie z. B. einem statistischen Bezirk, und der anschließende Vergleich der summierten sensitiven Flächen auf dieser höheren Ebene nicht Ziel der Analyse war.

Zur Ermittlung der Teilklimawirkung des Trockenstresses für die Stadtbäume wurde ebenfalls die KWB in der forstlichen Vegetationszeit als Klimasignal verwendet. Als Sensitivität kam die klimatische Eignung der jeweiligen Baumart nach *KLAM-Stadt* zum Einsatz. Da die Stadtbäume als Punktdaten vorliegen, wurden sie mittels eines Puffers von 5 m Radius um jeden Baum in Flächendaten überführt (*Buffer*) und jeder Polygonfläche der Mittelwert der Eignung der sich darauf befindlichen Bäume zugeordnet (*Feature to point, Spatial join*). Die Variablen für Klimasignal und Sensitivität wurden skalentransformiert und normalisiert. Die Teilklimawirkung ergab sich nach räumlicher Überlagerung der Vektordatensätze von Klima-

signal und Sensitivität (*Intersect*) durch Multiplikation der Indikatoren nach Gleichung (20) (vgl. Kapitel 4.6.3).

Die Teilklimawirkungen für Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume wurden zur Gesamtklimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* aggregiert. Die Vektordatensätze der Teilklimawirkungen werden hierzu räumlich zusammengefügt (*Union*). Infolge der drei Teilklimawirkungen ergibt sich die Gesamtklimawirkung aus einer absoluten und einer relativen Komponente, entsprechend der Gleichungen (21) und (22) (vgl. Kapitel 4.3.3, 4.6.3). Da auf den einzelnen Flächen nur jeweils eine Teilklimawirkung vorhanden sein kann, entspricht die relative Komponente der vorhandenen Teilklimawirkung, wie z. B. Ackerfläche, und die absolute Komponente ergibt sich als Mittel aus der vorhandenen und den zwei nicht vorhandenen Teilklimawirkungen, z. B. ein Feld mit Teilklimawirkung Ackerfläche und nicht vorhandenen Teilklimawirkungen für Waldfläche und Stadtbäume. Für die nicht vorhandenen Teilklimawirkungen werden Substitutionswerte nach Gleichung (23) bestimmt und für die Berechnung der absoluten Komponente in den Gleichungen (21) und (22) verwendet (vgl. Kapitel 4.6.3). Die Gesamtklimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* ergibt sich für jede Polygonfläche als normalisiertes arithmetisches Mittel aus absoluter und relativer Komponente.

### ***Überschwemmungen durch Starkregen***

Als Klimasignal wurde das Sturzflutpotenzial konvektiver Zellen im Sommerhalbjahr genutzt (vgl. Kapitel 4.7.1), das mittels Skalen-Transformation und Normalisierung bearbeitet wurde. Das Ergebnis der Überschwemmungsmodellierung in Form des Rasterdatensatzes der Überflutungshöhen bildete die Basis für die Sensitivität bzgl. Überschwemmungen durch Starkregen (vgl. Kapitel 4.7.2). Das Raster wurde in einen Vektordatensatz umgewandelt (*Raster to polygon*) und die Überflutungshöhen skalentransformiert und normalisiert. Wie bei der Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* wurde die Flächengröße der Überschwemmungsflächen nicht in die Wertung einbezogen (vgl. Gleichung (29)). Zur Ermittlung der Klimawirkung wurden die Vektordatensätze des Klimasignals und der Sensitivität räumlich überlagert (*Intersect*) und für jede Polygonfläche das Produkt der beiden normalisierten Indikatoren entsprechend der Gleichung (30) gebildet und wieder auf den Wertebereich [1,2] normalisiert (vgl. Kapitel 4.7.3).

### ***Priorisierung und kartografische Aufbereitung***

Die Ergebnisflächen der Klimawirkungen auf Ebene der konkreten Flächen sind sehr heterogen was Größe und Form betrifft. Gleichzeitig stellt sich die Frage, für welche Flächenkulisse Planungshinweise gegeben werden sollen. Es wird klar, dass einerseits Flächen nach festzulegenden Kriterien priorisiert werden müssen und diese andererseits für die Verwendung in einer *Planungshinweiskarte* kartografisch aufbereitet werden sollten.

Die Priorisierung dient der bewussten Einschränkung auf Flächen für die ein hoher Handlungsbedarf besteht. Somit werden Flächen entfernt für die keine starken Klimawirkungen erwartet werden. Ein weiterer Grund für die Priorisierung können begrenzte finanzielle Mittel der Kommune für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen sein. Flächen die bereits in der Gegenwart (1981-2010) eine überdurchschnittliche Klimawirkung aufweisen, werden infolge der Veränderung der klimatischen, demographischen und sozio-ökonomischen Randbedingungen künftig wahrscheinlich besonders stark betroffen sein. Für die Priorisierung werden deshalb Flächen ausgewählt, die in der Klimaperiode 1981-2010 eine überdurchschnittliche Klimawirkung aufweisen, d. h. Flächen mit Standardabweichungen größer als 0,5 der Klassen „schwach überdurchschnittlich“ und „stark überdurchschnittlich“. Die Priorisierung führte zu einer Reduzierung des ursprünglichen Flächenumfangs auf ca. 40 % für die Wärmebelastung (970 ha), ca. 23 % für den Trockenstress (1.260 ha) und ca. 19 % für die lokalen Überschwemmungen (85 ha).

Für eine ansprechendere Kartendarstellung wurden die priorisierten Flächen der Klimawirkungen einer differenzierten Generalisierung unterzogen. Dabei wurden die Flächen der Klimawirkungen bzw. Teilklimawirkungen unterschiedlich stark zusammengefasst, ihre Topologie vereinfacht und die Konturen geglättet (*Aggregate polygon*, *Simplify polygon*, *Smooth polygon*). Bei sehr kleinen Flächen, wie z. B. beim *Trockenstress für Stadtbäume*, wurden diese zuvor zusätzlich gepuffert, d. h. zur besseren optischen Wahrnehmung vergrößert (*Buffer*).

### ***Zusätzliche Inhalte***

Neben den Klimawirkungen werden weitere relevante Informationsebenen in die *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* eingearbeitet, die in Tabelle 14 (Anhang) aufgeführt sind. Die Darstellung kann ähnlich den *Klimaanalyse-* und *Planungshinweiskarten* für das Stadtklima in Form von Flächen oder Symbolen und Piktogrammen erfolgen (vgl. VDI-KRL 2008).

Für die Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung* sind es einerseits Punktsignaturen für Einrichtungen, in denen sich besonders hitzesensitive Personengruppen aufhalten. Dazu zählen Seniorenheime, Kindertagesstätten und Krankenhäuser, deren Standorte dem Internet entnommen wurden (STJE 2016a, 2016b, UKJ 2016). Des Weiteren werden wichtige Kaltluftleitbahnen aufgenommen, die während sommerlicher Strahlungswetterlagen nach Sonnenuntergang Kaltluft in die Stadt befördern und zur Abkühlung der überwärmten Siedlungsbereiche beitragen. Die Kaltluftzufuhr erfolgt in Jena besonders während der ersten Nachthälfte bodennah durch die Nebentäler des Saaletals (TLUG 2001, HOFFMANN et al. 2014). Zur räumlichen Abgrenzung der Kaltluftleitbahnen diente eine Kaltluftvolumenstromdichte von  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  im Mittel der ersten Nachthälfte, was den ersten vier Stunden der Kaltluftsimulation entspricht (vgl. Kapitel 3.2). Der Wert von  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  entstammt der thüringenweiten Kaltluftsimulation der TLUG (GROSS et al. 2000) und markiert die untere Klassengrenze der höchsten Klasse der Kaltluftvolumenstromdichte. Die Rasterdaten für die Zeitschnitte der ersten vier Stunden der DWD-Kaltluftsimulation werden gemittelt (*Raster calculator*) und Bereiche mit  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  oder mehr übernommen (*Reclassify*). Diese Flächenkulisse wird anschließend in Vektordaten umgewandelt (*Raster to polygon*) und für eine bessere Darstellung generalisiert (*Aggregate polygon, Simplify polygon, Smooth polygon*).

Für die Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* wurden zwei Informationsebenen zusätzlich aufgenommen. Die erste sind bekannte Feuerwehreinsatzorte nach Starkniederschlagsereignissen (vgl. Kapitel 4.7.3). Hierzu wurde die Einsatz-tabelle in das GIS geladen und die Einsatzorte über die vorhandenen Gauss-Krüger-Koordinaten dargestellt (*Display xy data*). Häufungen von Einsätzen an einer Lokalität und sehr dicht beieinanderliegende Einsatzorte wurden zur besseren optischen Darstellung ausgedünnt. Als zweites wurden Lokaltäten gekennzeichnet, an denen besonders erosionsgefährdete Abflussbahnen (TLUG 2011) auf Ackerland an Straßen, Bahnlinien und Siedlungsbereiche grenzen. In diesen Tiefenlinien können nach Starkregenereignissen erosive Sturzfluten entstehen, die durch Verfrachtung von Oberboden erhebliche Schäden verursachen. Die Vektordatensätze der Infrastrukturen und der Ortslage wurden mit 5 m gepuffert (*Buffer*), zusammengeführt (*Union*) und mit den erosionsgefährdeten Abflussbahnen auf Ackerland räumlich überlagert (*Intersect*).

#### 4.9.2 Zielstellungen und Handlungsempfehlungen

Die Zuweisung von Anpassungsmaßnahmen auf Flächen mit hoher Klimawirkung bedarf einer Zielvorgabe. Diese umschreibt, was durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen

angestrebt wird, und orientiert sich an der jeweiligen Klimawirkung und dem räumlichen Kontext. In Anlehnung an das *JenKAS*-Projekt (KURMUTZ et al. 2012) wurden neun Zielstellungen für die untersuchten (Teil-)Klimawirkungen und zusätzlichen relevanten Informationsebenen festgelegt. Für die Zielstellungen wurden Empfehlungsgruppen definiert, die jeweils eine Reihe von Handlungsempfehlungen enthalten, die bei Umsetzung geeignet sind, nachhaltige Anpassungseffekte für die verschiedenen Klimawirkungen zu erzielen. Die Anpassungsmaßnahmen entstammen dem im *JenKAS*-Projekt entwickelten Entscheidungsunterstützungswerkzeug *JELKA* (Jenaer Entscheidungsunterstützung für lokale Klimawandelanpassung, KURMUTZ et al. 2012), einer Datenbank mit 118 Maßnahmen, die auf Praxisleitfäden und Maßnahmensammlungen beruht (STEINRÜCKE et al. 2010, BRANDL et al. 2011, GREIVING 2013, UBA 2016). Die Anpassungsmaßnahmen sind im *JELKA* u. a. mit Informationen zu Kosten- und Zeitaufwand, Zielgruppe, Handlungsfeld und rechtlichen Grundlagen unterlegt.

#### 4.9.3 Planungshinweiskarte Klimaanpassung

Zur Erstellung der *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* wurden die Flächenkulissen der Klimawirkungen (vgl. Kapitel 4.9.1) mit den Zielstellungen und Handlungsempfehlungen (vgl. Kapitel 4.9.2) räumlich verknüpft und kartografisch aufbereitet. Nach Zusammenführung der generalisierten Flächen der Klimawirkungen (*Union*) ergaben sich Flächen mit Überlagerungen von bis zu drei möglichen Klimawirkungen, z. B. überwärmte Innenstadtbereiche mit Stadtbäumen unter Trockenstress und gelegentlichen Überschwemmungen durch Starkregen. Derartige Kombinationen wurden zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung auf zwei Klimawirkungen reduziert. Dabei erhielten die Klimawirkungen mit der höchsten räumlichen Auflösung Vorrang. Im vorgenannten Beispiel sind dies Trockenstress und Überschwemmung. Gleichzeitig bleibt die Information zur Wärmebelastung dadurch erhalten, dass die kleinteiligen Flächen mit den verbleibenden beiden Klimawirkungen von großen Flächen mit Wärmebelastung umgeben sind.

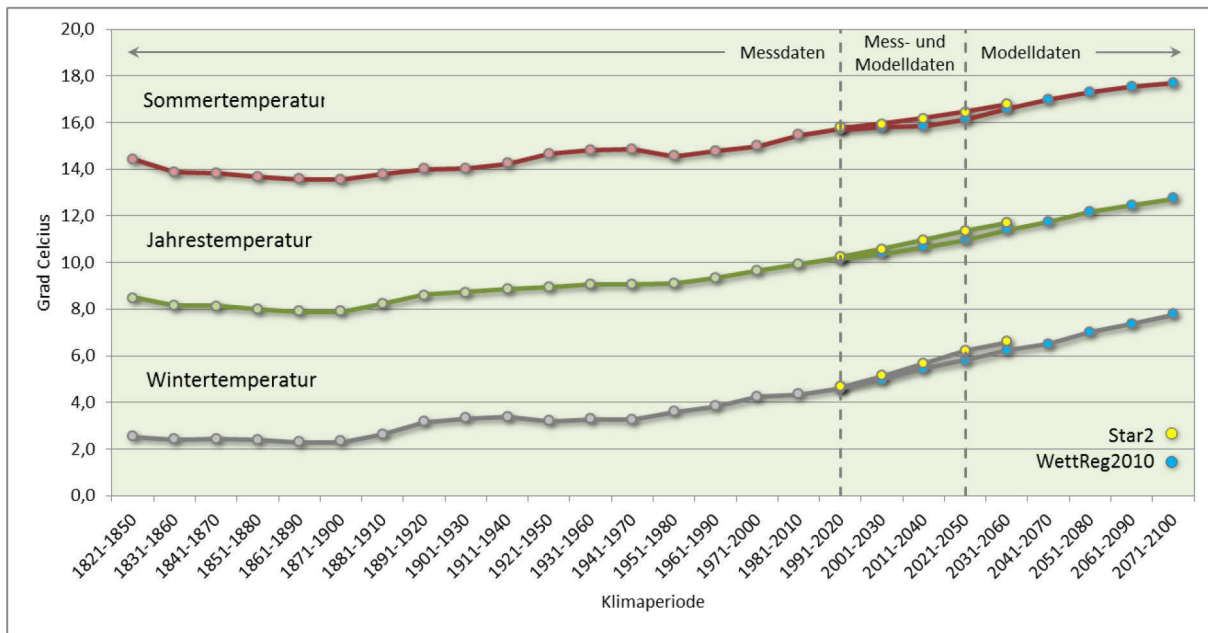
Der Maßstab der Karte ist mit 1:15.000 an den Flächennutzungsplan der Stadt Jena angelehnt und besitzt Übersichtscharakter. Die Klimawirkungen und Zusatzinformationen wurden mit assoziativen Farben und Symbolen dargestellt. Des Weiteren wurden Topografie (Relief, Ortslage, Bebauung, Gewässer) und Bezirksgrenzen zur Orientierung eingefügt. In Bereichen mit sich überlagernden Klimawirkungen ergeben sich Handlungsempfehlungen mit mehreren Empfehlungsgruppen, die schraffiert in den Farben der Klimawirkungen dargestellt sind.

## 5. Ergebnisse

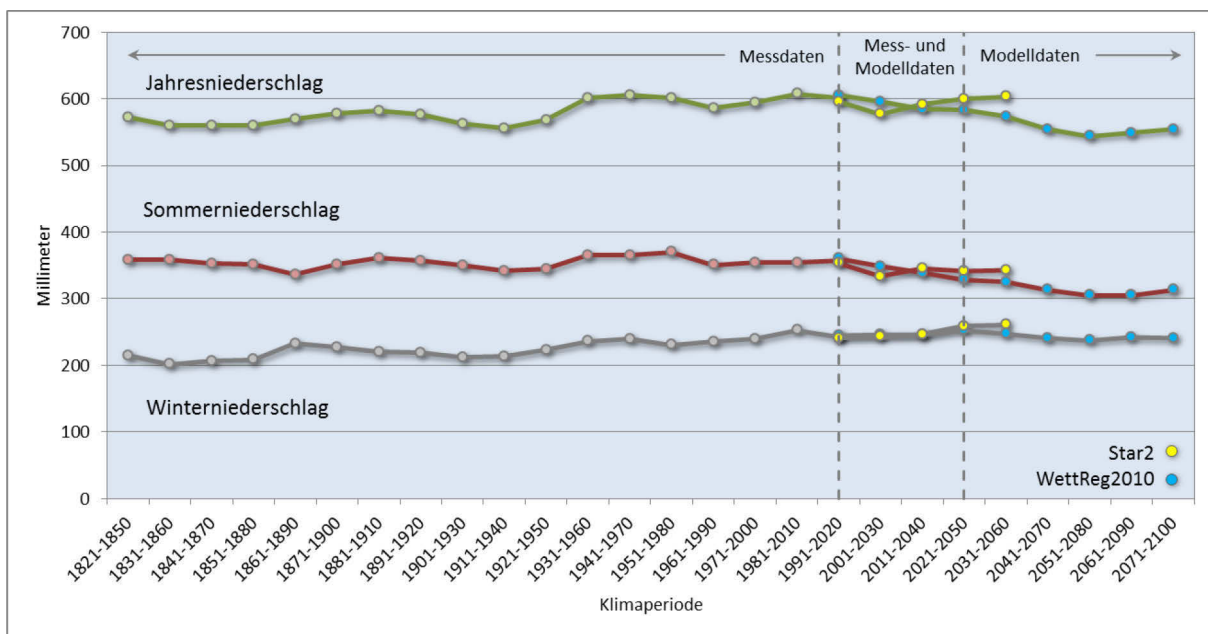
### 5.1 Stationsbezogene Auswertung

Die stationsbezogenen Ergebnisse hinsichtlich der klimatischen Veränderungen basieren auf der statistischen Auswertung der Messdaten der DWD-Station Jena-Sternwarte für den Zeitraum 1824-2015. Zusätzlich wurden Projektionen statistischer Regionalklimamodelle für die Station für den Zeitraum 2016-2100 (WETTREG2010) und STAR2 (2016-2060) analysiert (vgl. Kapitel 4.4). Für Jena ist eine Veränderung des Klimas nachweisbar. Abbildung 29 (S. 106) zeigt die Entwicklung der mittleren Temperaturen für das Jahr, das Sommerhalbjahr (April-September) und das Winterhalbjahr (Oktober-März) als gleitende 30-jährige Mittel. Dabei ist über den Beobachtungszeitraum 1824-2015 ein Anstieg der Temperaturen zu verzeichnen. Die Jahrestemperatur stieg seit der Klimaperiode 1871-1900 kontinuierlich von 7,9 °C auf 9,9 °C in der Gegenwart (1981-2010). Die heutige DWD-Station lag bei ihrer Errichtung 1812/1813 noch außerhalb der Stadt und befindet sich heute aufgrund der Urbanisierung nahe dem Stadtzentrum. Somit wird der Anstieg der Temperatur auch durch eine Verstärkung des Stadtklimaeffektes seit Beginn der Messungen mitgetragen. Spätestens seit Anfang des 20. Jahrhunderts unterliegt das Umfeld der Messstation städtischem Einfluss (NAWROTZKI 2014). Folglich kann die Temperaturdifferenz zwischen den Klimaperioden 1901-1930 (8,7 °C) und 1981-2010 (9,9 °C), also etwa 1,2 Kelvin, auf großräumige Klimaänderungen zurückgeführt werden. Dies bestätigen auch Vergleiche mit den Messreihen der nahe gelegenen Stationen Gera-Leumnitz und Weimar, die ab der Periode 1951-1980 vorliegen (GUDE et al. 2009; KURMUTZ et al. 2012). Aus Abbildung 29 (S. 106) erkennt man ebenfalls, dass sich die bisher beobachteten Trends fortsetzen werden. So projizieren beide Modelle für die Lufttemperatur einen weiteren Anstieg im Gesamt-, Sommer- und Winterhalbjahr.

Die Entwicklung des mittleren Niederschlages im Gesamt-, Sommer- und Winterhalbjahr ist in Abbildung 30 (S. 106) aufgezeigt. Jahres- und Winterniederschlag unterliegen zwar Schwankungen, zeigen jedoch insgesamt eine leichte Zunahme bis zur Gegenwart: 1821-1850: 573 mm, 1981-2010: 608 mm im Jahr. Der Sommerniederschlag ist in dieser Zeit etwa gleichgeblieben. Für die künftige Entwicklung lassen die zwei Klimamodelle eine leichte Abnahme des Sommerniederschlags und eine geringe Zunahme des Winterniederschlags erkennen. Der künftige Jahresniederschlag wird trotz Schwankungen bis zur Periode 2021-2050 als weitgehend gleichbleibend projiziert. Durch die Entwicklung von Sommer- und Winterniederschlag kommt es eher zu einer leichten Umverteilung der Niederschläge im Jahresverlauf.



**Abbildung 29:** Entwicklung der mittleren Jahres-, Sommer- und Winterlufttemperatur für den Zeitraum 1824-2100 an der DWD-Station Jena-Sternwarte. Darstellung als gleitende 30-jährige Mittel. Sommerhalbjahr: April-September, Winterhalbjahr: Oktober bis März. Daten der Jahre 1824-2015 als Messungen des DWD, Daten der Jahre 2016-2100 (WETTREG2010) bzw. 2016-2060 (STAR2) als Projektionen für das SRE-Szenario A1B. Alle Daten entstammen ReKIS (eigene Darstellung)



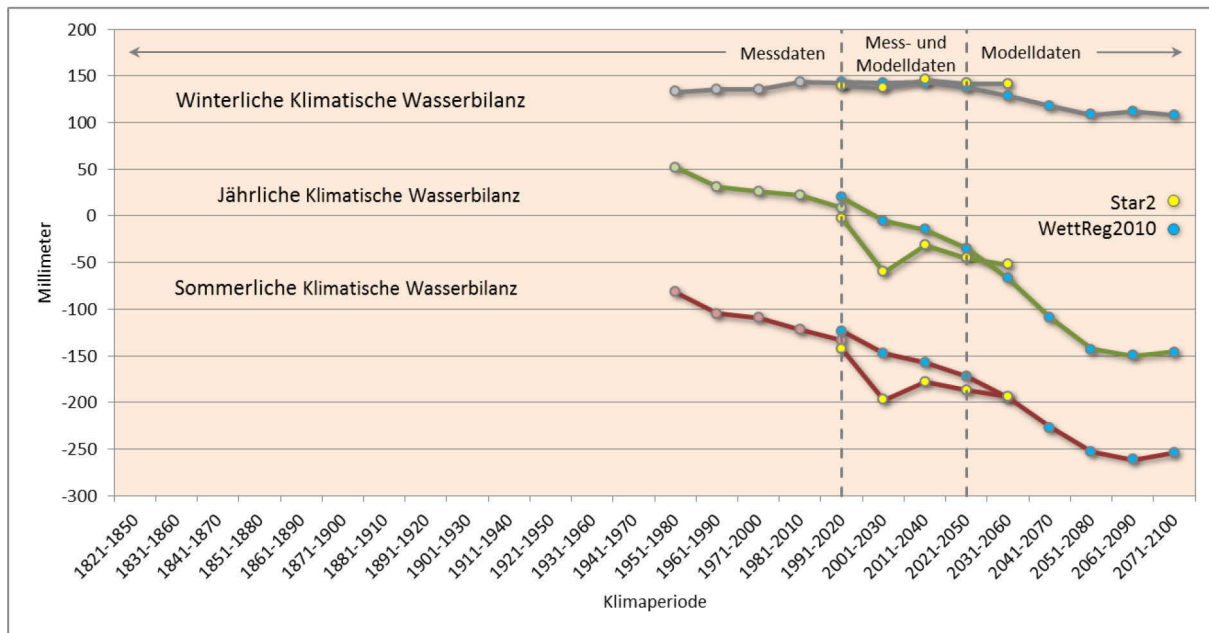
**Abbildung 30:** Entwicklung des mittleren Jahres-, Sommer- und Winterniederschlags für den Zeitraum 1824-2100 an der DWD-Station Jena-Sternwarte. Darstellung als gleitende 30-jährige Mittel. Sommerhalbjahr: April-September, Winterhalbjahr: Oktober bis März. Daten der Jahre 1824-2015 als Messungen des DWD, Daten der Jahre 2016-2100 (WETTREG2010) bzw. 2016-2060 (STAR2) als Projektionen für das SRE-Szenario A1B. Alle Daten entstammen ReKIS (eigene Darstellung)



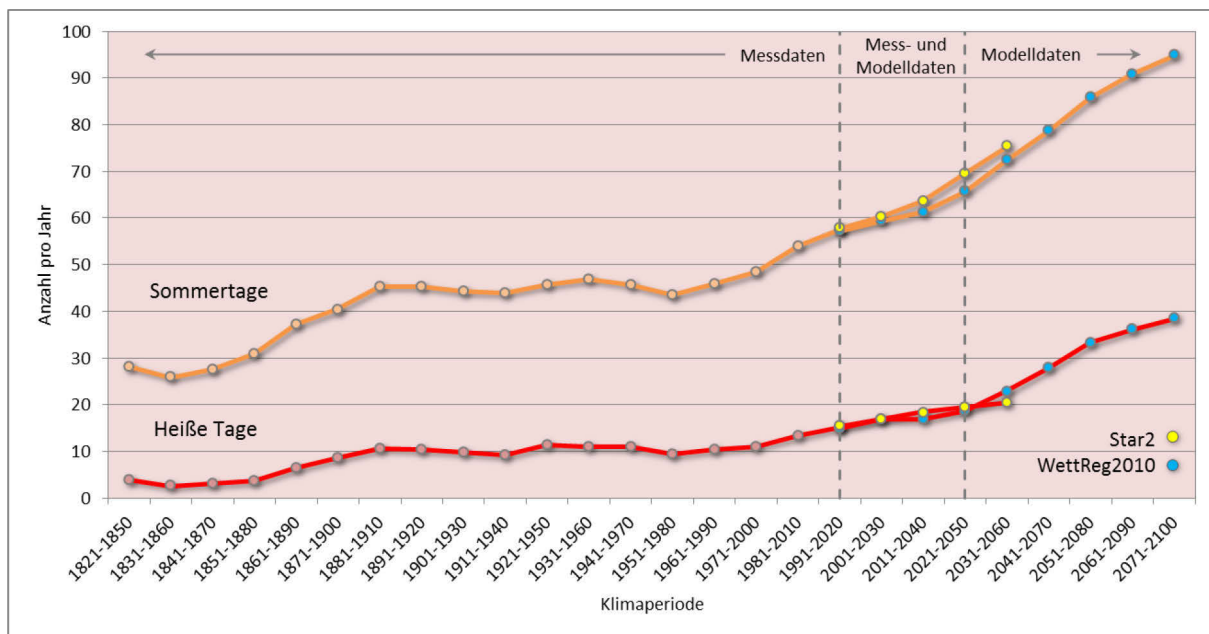
Für die klimatische Wasserbilanz (KWB), als Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung, sind Aussagen aufgrund der Datenlage erst ab 1951 möglich. Die Verringerung der jährlichen KWB bis zur Gegenwart ist in Abbildung 31 (S. 108) gut zu erkennen. Während die winterhalbjährliche KWB leicht zunimmt, verringert sich die KWB im Sommerhalbjahr stark. Die sommerliche Abnahme der KWB ist vor allem durch die stärkere Verdunstung infolge der höheren Sommertemperaturen begründet. Die KWB wird sich laut Klimaprojektionen im Sommerhalbjahr und im Gesamtjahr weiter verringern, bevor es ab 2051-2080 zu einer Stabilisierung kommt. Für das Winterhalbjahr zeigen beide Modelle bis Mitte des Jahrhunderts eine etwa gleichbleibende KWB, bevor ab der Klimaperiode 2031-2060 eine leichte Verschlechterung eintritt (WETTREG2010).

Die Veränderung der Klimaverhältnisse Jenas kann auch anhand der Auftrittshäufigkeit klimatologischer Kenntage beschrieben werden (vgl. Kapitel 3.2, 4.4). Abbildung 32 (S. 108) zeigt die Entwicklung der Sommertage und Heißen Tage. Es fällt auf, dass beide Kenntage zwischen den Klimaperioden 1821-1850 und 1981-2010 stark zugenommen haben: Sommertage: +90 %, Heiße Tage: +240 %. Diese Entwicklung wird sich nach den Projektionen der Regionalklimamodelle fortsetzen und könnte bis Ende des Jahrhunderts bis zu 95 Sommer- und 40 Heiße Tage im Mittel pro Jahr bedeuten. Im Gegensatz dazu steht die Entwicklung der Frost- und Eistage, die in Abbildung 33 (S. 109) abgebildet ist. Hier ist für beide Kenntage eine Abnahme zwischen den Klimaperioden 1821-1850 und 1981-2010 zu erkennen: Frostage: -20 %, Eistage: -50 %. Dieser Trend wird laut der Modelle auch in Zukunft anhalten, so dass die Eistage Ende des Jahrhunderts gegen Null streben. Für die Stark- und Extremregentage sind die Veränderungen weniger stark ausgeprägt (Abbildung 34, S. 109). Zwar ergeben sich relative Änderungen von +35 % bzw. +55 %, was jedoch absolut nur 2,3 bzw. 0,6 Tage mehr pro Jahr bedeutet. Für künftige Klimaperioden laufen die Projektionen der Klimamodelle auseinander. Während *STAR2* für beide Kenntage eine Zunahme projiziert, zeigt *WETTREG2010* für beide Kenntage eine Abnahme. Dies ist ein Hinweis auf die geringe Belastbarkeit von Klimamodellen für die Projektion von seltenen Extremereignissen.

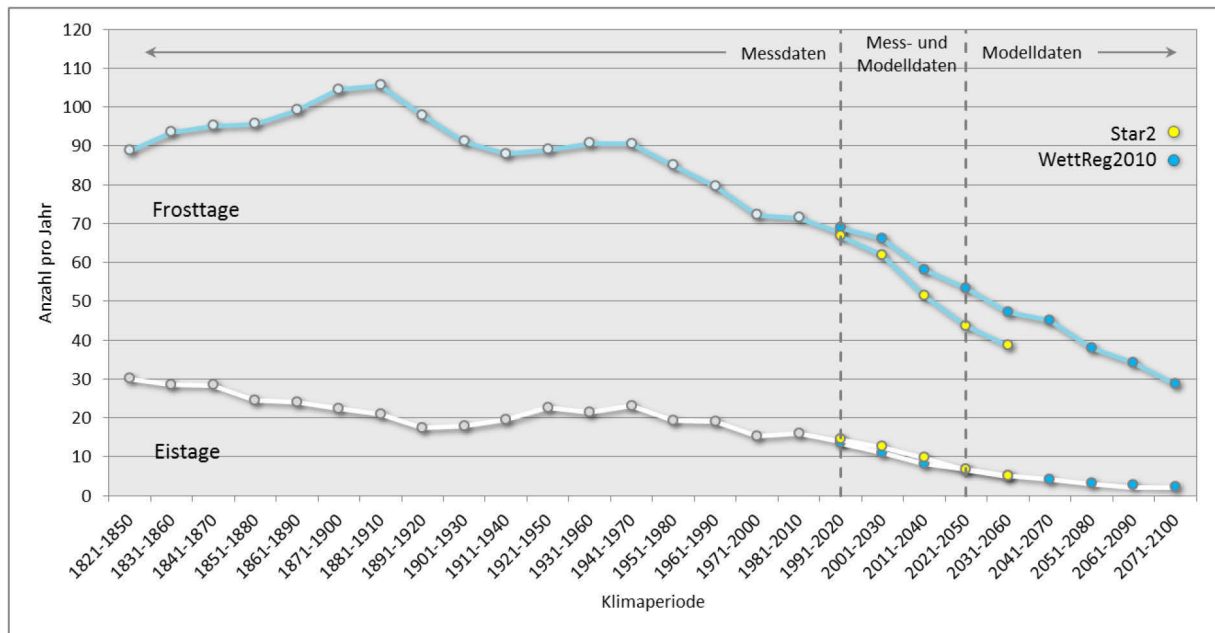
Insgesamt bestätigen die Ergebnisse eine Klimaveränderung seit dem frühen 19. Jahrhundert. Kennzeichnend ist eine signifikante Zunahme der Temperatur und temperaturbezogenen Kenntage, während für den Niederschlag und seine Kenntage nur leichte Zu- oder Abnahmen auftraten. Nach den Projektionen regionaler Klimamodelle werden sich diese Trends bis Ende des 21. Jahrhunderts weitestgehend fortsetzen.



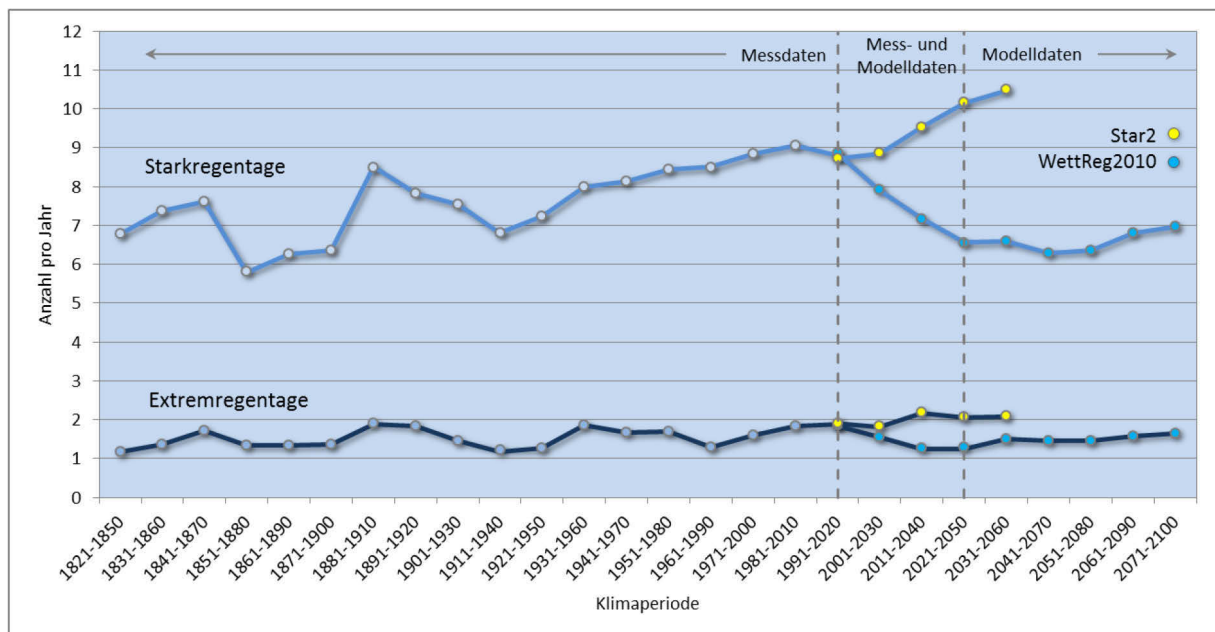
**Abbildung 31: Entwicklung der mittleren klimatischen Wasserbilanzen für Sommer- und Winterhalbjahr sowie das Gesamtjahr für den Zeitraum 1951-2100 an der DWD-Station Jena-Sternwarte. Darstellung als gleitende 30-jährige Mittel. Sommerhalbjahr: April-September, Winterhalbjahr: Oktober bis März. Daten der Jahre 1951-2015 als Messungen des DWD, Daten der Jahre 2016-2100 (WETTREG2010) bzw. 2016-2060 (STAR2) als Projektionen für das SRE-Szenario A1B. Alle Daten entstammen ReKIS (eigene Darstellung)**



**Abbildung 32: Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von Sommertagen ( $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ ) und Heißen Tagen ( $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$ ) für den Zeitraum 1824-2100 an der DWD-Station Jena-Sternwarte. Darstellung als gleitende 30-jährige Mittel. Sommerhalbjahr: April-September, Winterhalbjahr: Oktober bis März. Daten der Jahre 1824-2015 als Messungen des DWD, Daten der Jahre 2016-2100 (WETTREG2010) bzw. 2016-2060 (STAR2) als Projektionen für das SRE-Szenario A1B. Alle Daten entstammen ReKIS (eigene Darstellung)**



**Abbildung 33:** Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von Frosttagen ( $T_{\min} < 0\text{ °C}$ ) und Eistagen ( $T_{\max} < 0\text{ °C}$ ) für den Zeitraum 1824-2100 an der DWD-Station Jena-Sternwarte. Darstellung als gleitende 30-jährige Mittel. Sommerhalbjahr: April-September, Winterhalbjahr: Oktober bis März. Daten der Jahre 1824-2015 als Messungen des DWD, Daten der Jahre 2016-2100 (WETTREG2010) bzw. 2016-2060 (STAR2) als Projektionen für das SRE-Szenario A1B. Alle Daten entstammen ReKIS (eigene Darstellung)

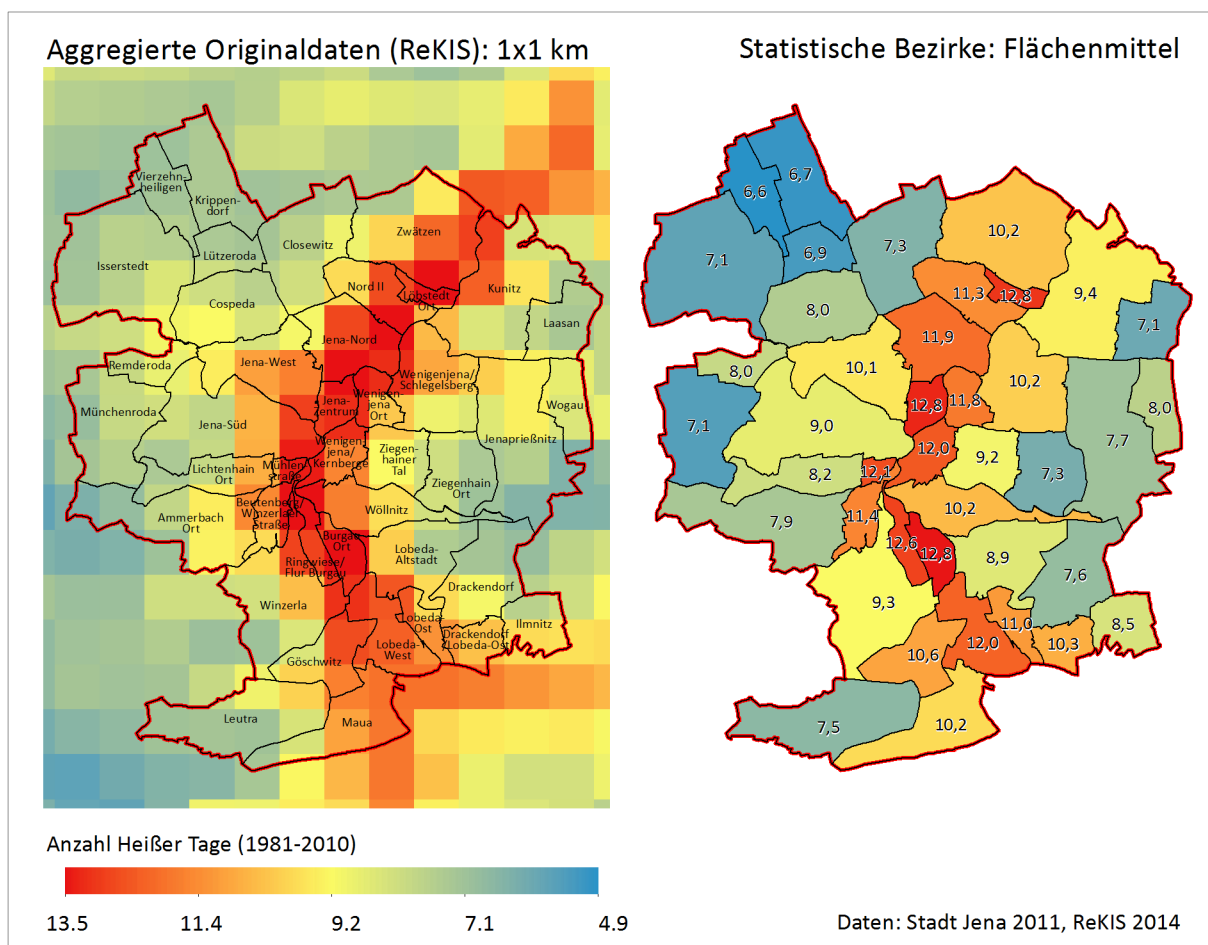


**Abbildung 34:** Entwicklung der mittleren jährlichen Anzahl von Starkregentagen (Tagesniederschlag  $\geq 12,7\text{ mm}$ , 95. Perzentil der Regentage für 1981-2010) und Extremregentagen (Tagesniederschlag  $\geq 24,4\text{ mm}$ , 99. Perzentil der Regentage für 1981-2010) für den Zeitraum 1824-2100 an der DWD-Station Jena-Sternwarte. Darstellung als gleitende 30-jährige Mittel. Sommerhalbjahr: April-September, Winterhalbjahr: Oktober bis März. Daten der Jahre 1824-2015 als Messungen des DWD, Daten der Jahre 2016-2100 (WETTREG2010) bzw. 2016-2060 (STAR2) als Projektionen für das SRE-Szenario A1B. Alle Daten entstammen ReKIS (eigene Darstellung)

## 5.2 Wärmebelastung für die Bevölkerung

### 5.2.1 Klimasignal

Als Indikator für das Klimasignal der *Wärmebelastung für die Bevölkerung* diene die mittlere jährliche Anzahl Heißer Tage. Abbildung 35 zeigt die Daten in originaler Auflösung und als Flächenmittel für die statistischen Bezirke. Trotz grober räumlicher Auflösung von 1.000 m grenzt sich das Saaletal mit bis zu 13 Heißen Tagen deutlich gegenüber den umliegenden Hochflächen ab, die nur etwa die Hälfte der Anzahl Heißer Tage des Saaletals erreichen. Die Anzahl Heißer Tage reicht in den statistischen Bezirken im Mittel von 6,6 Tagen pro Jahr auf den Hochflächen der Saaleplatte bis zu 12,8 Tagen pro Jahr im Talgrund des Saaletals. Abbildung 36c (S. 112) stellt die klassifizierte Ergebnisse für das Klimasignal dar. Die höchsten Werte werden in den Bezirken Jena-Zentrum, Burgau-Ort, Löbstedt-Ort erreicht, während die geringsten Werte mit den Bezirken auf den Hochflächen korrelieren, die besser durchlüftet sind, wie z. B. Krippendorf, Vierzehnheiligen, Lützeroda.



**Abbildung 35: Mittlere jährliche Anzahl Heißer Tage im Untersuchungsgebiet Jena für die Klimaperiode 1981-2010. Klimadaten entstammen ReKIS (eigene Darstellung)**

### 5.2.2 Sensitivität

Der Indikator für die Sensitivität setzt sich aus den Subindikatoren für den Wärmeinseleffekt und die hitzesensitive Bevölkerung zusammen. Beide Subindikatoren sind in Abbildung 36a,b (S. 112) dargestellt. Bei der hitzesensitiven Bevölkerung weisen Winzerla und Lobeda-West die höchsten Werte auf. Diese Bezirke sind durch Großwohnsiedlungen geprägt und es findet sich eine große Anzahl an Personen mit hoher sozialer Vulnerabilität mit Merkmalen wie z. B. „ab 65-jährig“, „ab 60 und alleinlebend“ oder „Niedriger sozio-ökonomischer Status“, aber auch grundsätzlich hohe Einwohnerzahlen. Am anderen Ende des Ranking finden sich ländlich geprägte Bezirke wie Laasan, Vierzehnheiligen und Remderoda. Für den Wärmeinseleffekt zeigen sich die höchsten Werte entlang der Talachse des Saaletals, wo sich auch der Hauptsiedlungskörper befindet, sowie im Bereich Neulobeda (Lobeda-Ost und -West). Wenig verdichtete Bezirke finden sich im Mittelfeld des Ranking, wie z. B. Lichtenhain-Ort, Löbstedt-Ort, Wenigenjena/Kernberge. Die Bezirke mit dem geringsten Wärmeinseleffekt sind die dörflich geprägten Bezirke, deren Siedlungsflächen von naturnahen Landnutzungen umgeben sind, wie z. B. Leutra, Closewitz, Laasan.

### 5.2.3 Klimawirkung der Gegenwart

Das abschließende Ergebnis für die Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung* zeigt die statistischen Bezirke Jena-Zentrum, Jena-Nord und Lobeda-West an vorderer Stelle (Abbildung 36d, S. 112). Hier konzentrieren sich hitzesensitive Bevölkerung, Wärmeinseleffekt und Anzahl Heiße Tage. Darauf folgen Bezirke mit schwach überdurchschnittlicher Klimawirkung wie Wenigenjena-Ort, Nord II oder Lobeda-Ost. Die Bezirke mit unterdurchschnittlicher Klimawirkung finden sich im dörflich geprägten, naturnahen Umland bzw. abseits des Hauptsiedlungskörpers, wie z. B. Laasan, Vierzehnheiligen oder Remderoda.

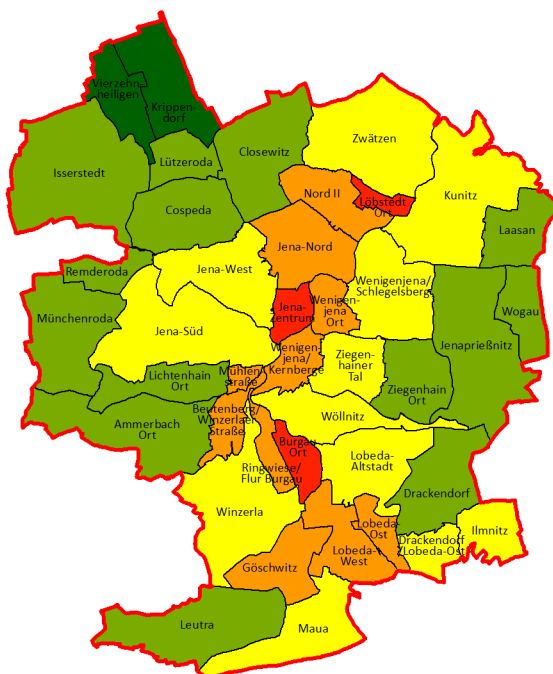
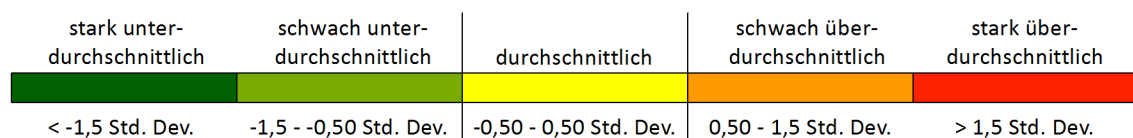
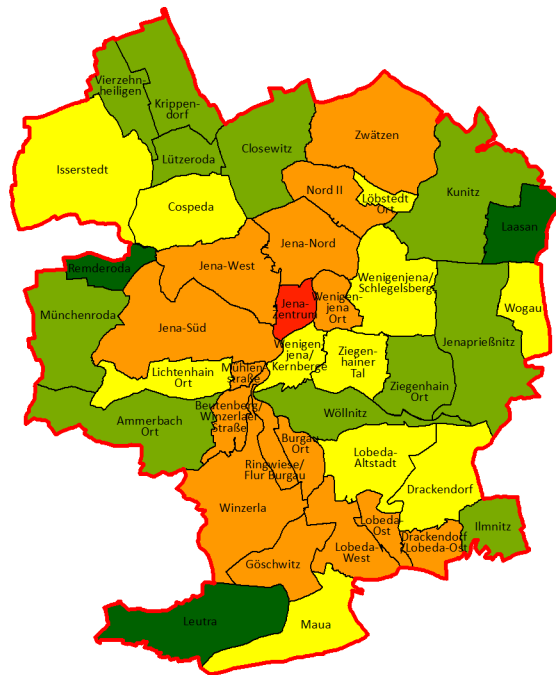
### 5.2.4 Künftige Klimawirkung

Zur Abschätzung der Veränderung des Klimasignals wird der *Climate change atlas* verwendet. Hierzu wurden zwei Variablen genutzt, für die Diagramme generiert wurden. In Abbildung 37 (S. 113) ist die Veränderung der maximalen täglichen bodennahen Lufttemperatur (*maximum near-surface temperature*) zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Raum Jena dargestellt. Erkennbar ist, dass für alle vier RCP-Szenarien im Ensemble-Mittel eine Erhöhung der jährlichen maximalen bodennahen Lufttemperatur für die Zukunft projiziert wird, die von etwa 1 °C (RCP2.6) bis rund 4 °C reicht (RCP8.5)

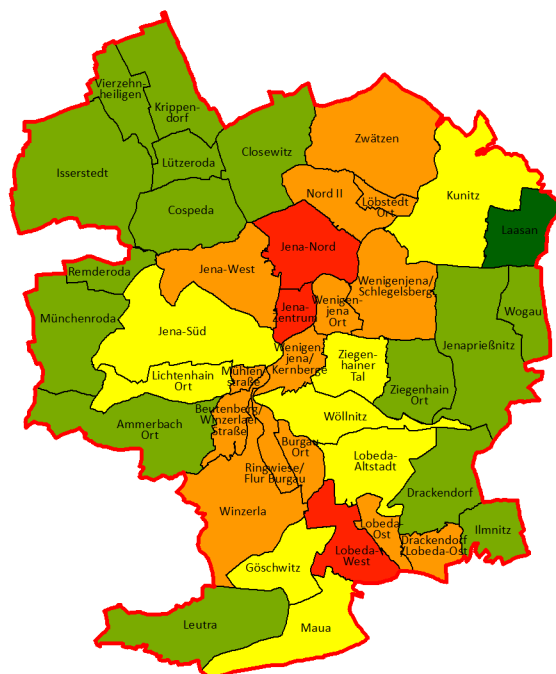
a) Sensitivität I: Hitzesensitive Bevölkerung



b) Sensitivität II: Wärmeinseleffekt



d) Klimawirkung: Wärmebelastung für die Bevölkerung

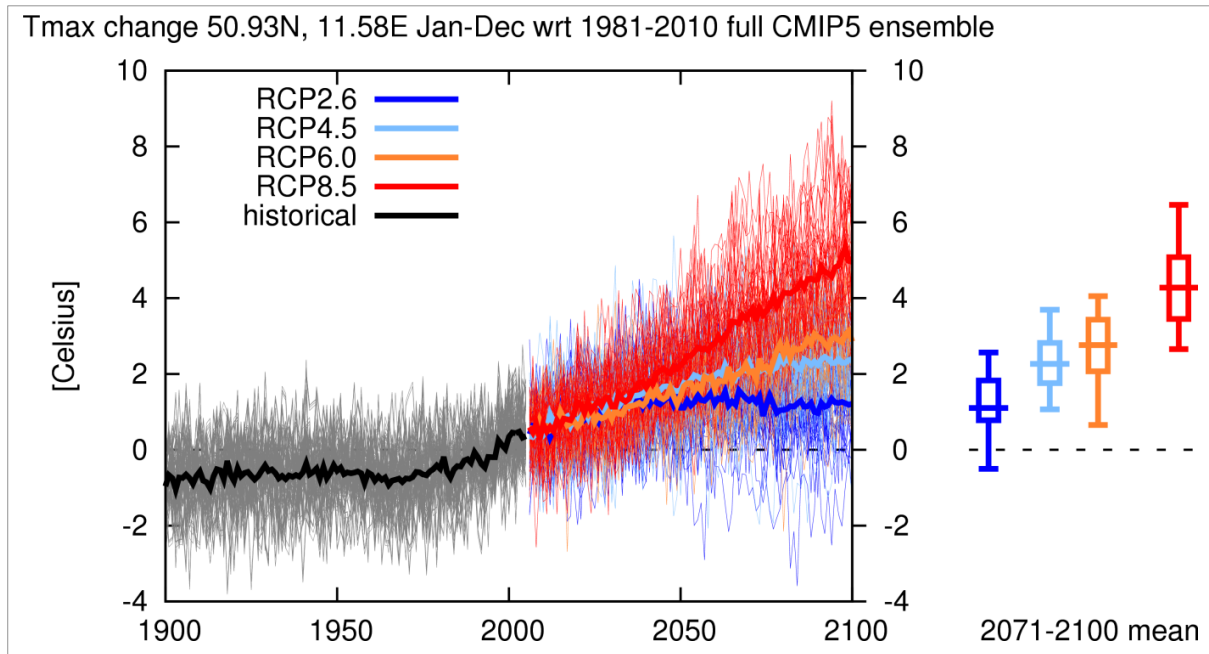


c) Klimasignal: Anzahl heißer Tage

Daten: Stadt Jena 2011/2013, Jenarbit 2014, ReKIS 2014, TLUG 2014

**Abbildung 36: Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung der Wärmebelastung für die Bevölkerung in den statistischen Bezirken Jenas für die Klimaperiode 1981-2010. Klassifizierung nach Standardabweichung (eigene Darstellung)**





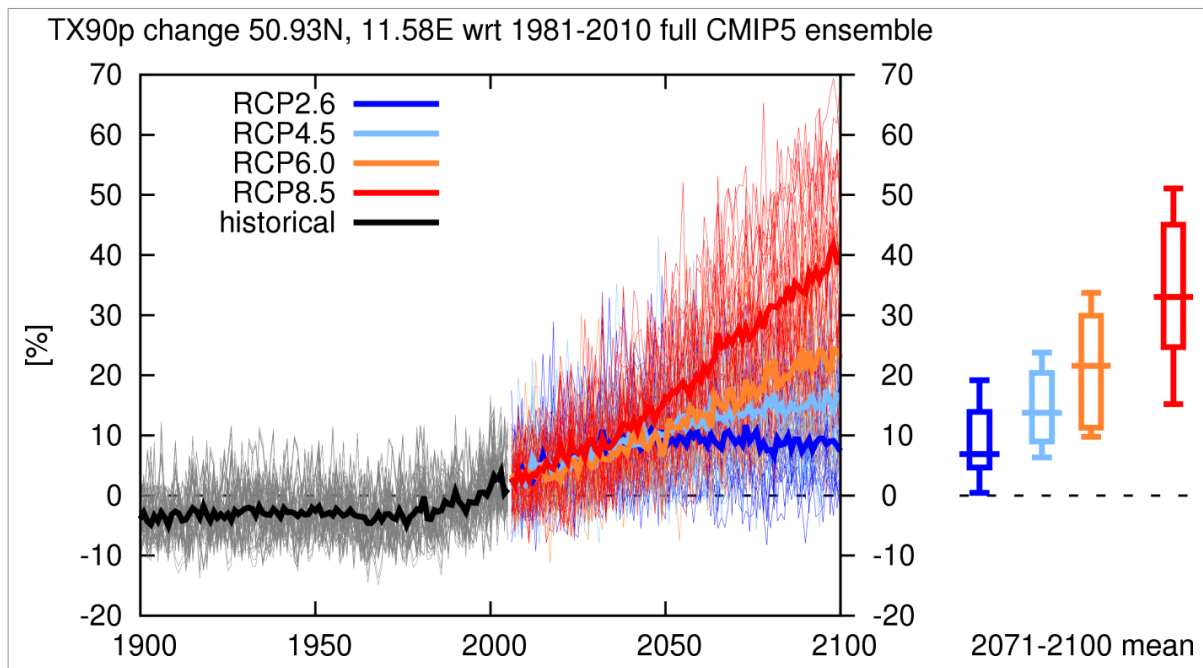
**Abbildung 37:** Veränderung der maximalen täglichen bodennahen Lufttemperatur (maximum near-surface temperature) zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena (50,93 N, 11,58 E) (KNMI 2015a)

Der Trend der Veränderung der maximalen täglichen bodennahen Lufttemperatur wird durch viele Modellergebnisse getragen und ist belastbar: *RCP2.6* mit 31 Modellen und insgesamt 64 Realisationen, *RCP4.5* mit 41 Modellen und 105 Realisationen, *RCP6.0* mit 23 Modellen und 43 Realisationen, *RCP8.5* mit 38 Modellen und 77 Realisationen.

Abbildung 38 (S. 114) zeigt die Veränderung der Anzahl an Tagen, deren Maximaltemperatur über dem 90. Perzentil der täglichen Maximaltemperatur (*TX90p*) der Gegenwart (1981-2010) liegt, zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100. Auch hier sind Steigerungen für alle *RCP*-Szenarien erkennbar, die sich zwischen 5 % (*RCP2.6*) und 30 % (*RCP8.5*) bewegen. Dies bedeutet, dass künftig Tage, die das 90. Perzentil der Tagesmaximaltemperatur überschreiten – für die DWD-Station Jena-Sternwarte in der Periode 1981-2010 sind dies 26,6 °C – zunehmen werden. Auch hierfür wurde eine Vielzahl an Modellen für die Szenarien ausgewertet: *RCP2.6* mit 19 Modellen und insgesamt 42 Realisationen, *RCP4.5* mit 25 Modellen und 50 Realisationen, *RCP6.0* mit 15 Modellen und 27 Realisationen, *RCP8.5* mit 24 Modellen und 48 Realisationen.

Einen weiteren Hinweis auf die künftige Entwicklung des Klimasignals liefert die *MUKLIMO\_3*-Modellierung des DWD im Rahmen des *JenKAS*-Projektes für die Anzahl Heiße Tage (vgl. Kapitel 4.5.4). Abbildung 39 (S. 115) zeigt für alle vier untersuchten regionalen Klimamodelle Steigerungen der Anzahl Heiße Tage zwischen den Klimaperioden 1971-2000

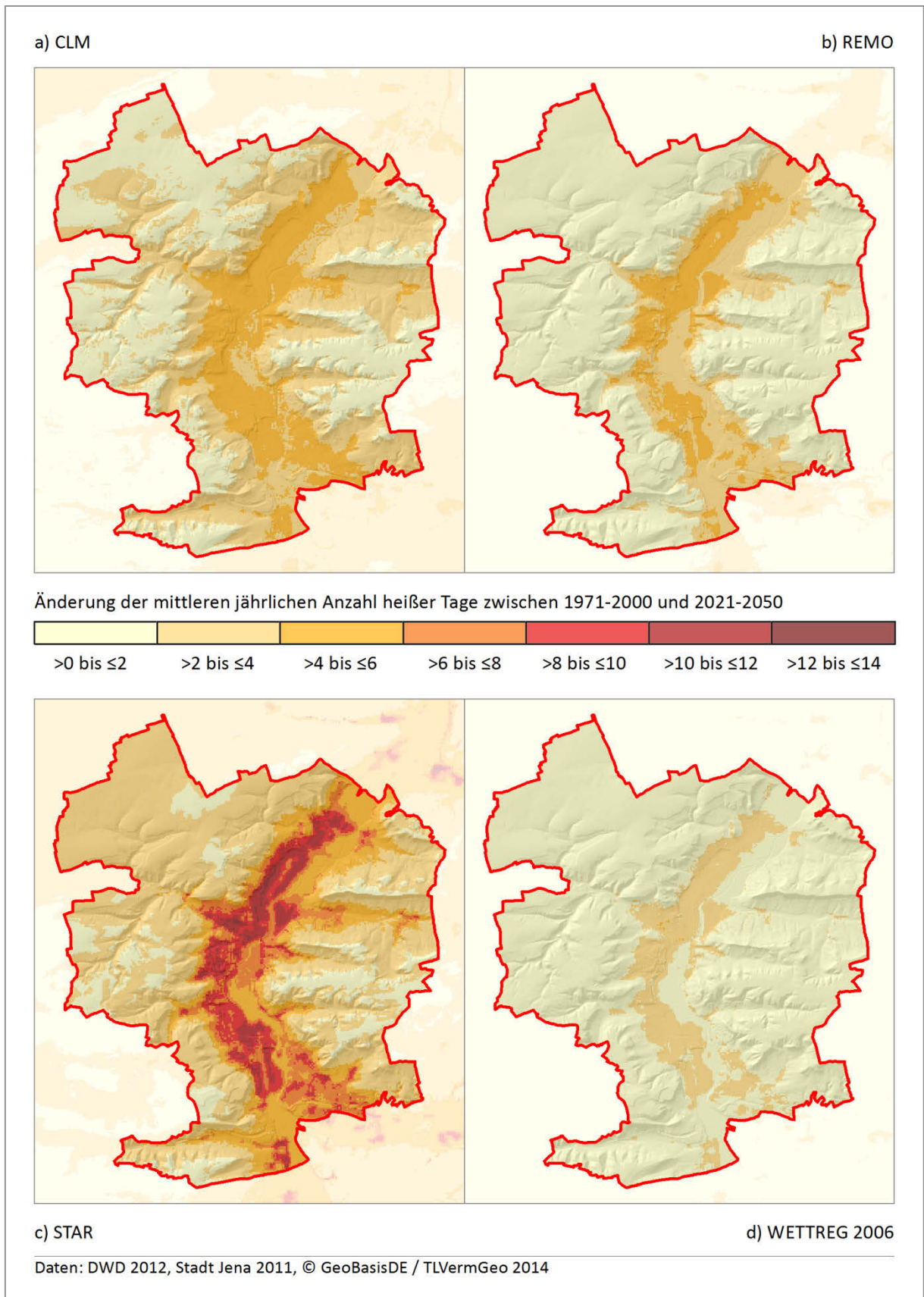
und 2021-2050. Die Zunahme fällt bei den Modellen unterschiedlich stark aus. Allen gemein ist, dass der Zuwachs der Anzahl Heißer Tage im bebauten Bereich entlang der Talachse am hochsten ausfallt. Fur die Simulation beider Klimaperioden wurde die Bebauung des Ist-Zustandes (ca. 2010) genutzt. Sollte die Flachenversiegelung und Bebauung in Zukunft zunehmen, konnte sich die reale Anzahl Heißer Tage aufgrund des verstärkten Warmeinseffektes weiter erhohen.



**Abbildung 38:** Veranderung der Anzahl an Tagen mit einer Maximaltemperatur uber dem 90. Perzentil der Gegenwart (1981-2010) zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena (50,93 N, 11,58 E) (KNMI 2015b)

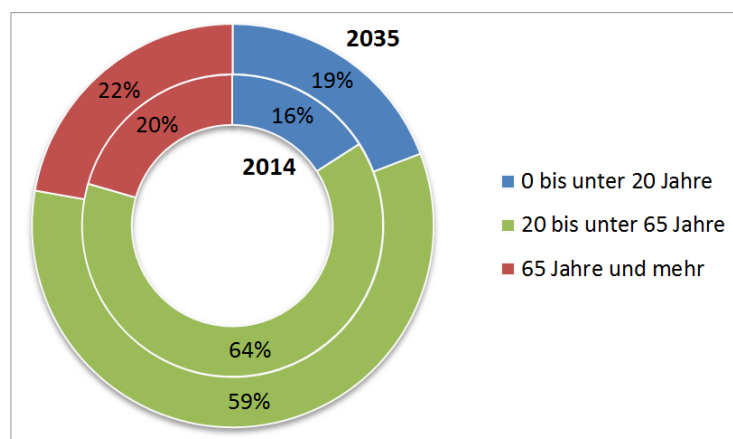
Wie bereits in Kapitel 5.1 dargestellt, gibt es seit der Klimaperiode 1951-1980 einen kontinuierlichen Anstieg der mittleren jahrlichen Anzahl Heißer Tage in Jena. In Verbindung mit den aufgezeigten kunftigen Veranderungen der maximalen Tagestemperaturen und der Anzahl der Tage mit Tagesmaximaltemperaturen uber dem 90. Perzentil der Gegenwart (1981-2010) sowie den *MUKLIMO\_3*-Ergebnissen kann eine Erhohung des Klimasignals bzgl. sommerlicher Warmebelastung bis Ende des 21. Jahrhunderts als sicher gelten.





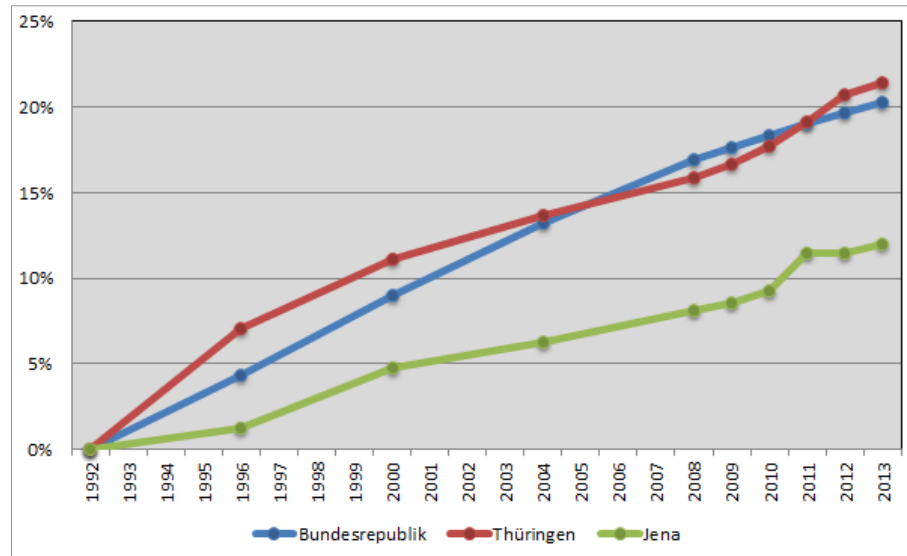
**Abbildung 39:** Veränderung der mittleren jährlichen Anzahl Heißer Tage zwischen den Klimaperioden 1971-2000 und 2021-2050 für die Regionalklimamodelle CLM, REMO, STAR und WETTREG2006 und das Szenario A1B (verändert nach HOFFMANN et al. 2014:174)

Neben der Veränderung des Klimasignals kann auch eine Veränderung der Sensitivität zu einer Veränderung der Klimawirkung führen. Aufgrund des demographischen Wandels werden künftig mehr Menschen besonders stark vom Hitzestress betroffen sein. Durch den bis 2060 prognostizierten Rückgang der Gesamtbevölkerung auf Bundes- und Landesebene (TLS 2010, SBA 2015a) wird zwar die Gesamtzahl der hitzesensitiven Bevölkerung abnehmen, der Anteil der besonders hitzesensitiven Gruppe der ab-65-Jährigen wird jedoch steigen. Für die Stadt Jena sieht es bis 2035 etwas positiver aus: insgesamt soll die Bevölkerungszahl leicht steigen, der Anteil der unter-20-Jährigen ebenfalls. Gleichzeitig wird auch in Jena der Anteil der ab-65-Jährigen steigen (TLS 2014, Abbildung 40). Dies bedeutet für Jena bis 2035 eine Zunahme der Gesamtbevölkerung bei gleichzeitiger Abnahme der „normal sensitiven“ Personen (20-64 Jahre) und einer Zunahme der besonders hitzesensitiven Personengruppe (ab 65 Jahre). Dieser demographische Trend spricht für eine Erhöhung der Sensitivität bzgl. sommerlicher Wärmebelastung in den nächsten Jahrzehnten.



**Abbildung 40: Entwicklung der Bevölkerung zwischen 2014 und 2035 nach Anteilen der Altersgruppen in Jena (verändert nach TLS 2014)**

Auch der zweite Subindikator der Sensitivität, der Wärmeinseleffekt, wird künftig Veränderungen unterliegen. Je größer die versiegelte Fläche wird und je stärker die Überbauung dieser, desto stärker der Wärmeinseleffekt und somit die Sensitivität. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche ist eine gute Annäherung an die Größe der versiegelten Fläche. Für die Bundesrepublik, Thüringen und Jena ist der Trend der Zunahme versiegelter Flächen eindeutig, wie Abbildung 41 (S. 117) illustriert. Zwar ist der Trend für Jena nicht so stark ausgeprägt wie für die Bundesrepublik oder Thüringen gesamt, dennoch gab es in den letzten 20 Jahren einen Zuwachs von 12 %. Da Jena eine wachsende Stadt ist, gibt es verstärkt Bemühungen, Flächen für die Bebauung zu erschließen bzw. durch Lückenschluss eine Nachverdichtung zu erreichen. Die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche sowie der Wachstumstrend Jenas sprechen für eine Zunahme der Sensitivität hinsichtlich sommerlicher Wärmebelastung.



**Abbildung 41: Prozentuale Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in der Bundesrepublik Deutschland, Thüringen und Jena zwischen 1992 und 2013 (verändert nach SBA 2015b, TLS 2015)**

Die vorangegangenen Ausführungen deuten darauf hin, dass künftig mit einer Verstärkung der Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung* in Jena gerechnet werden muss. Sowohl das Klimasignal als auch beide Subindikatoren der Sensitivität werden sich in, für die Belastungssituation, verstärkender Weise entwickeln. Während dieser Trend für das Klimasignal bis Ende des 21. Jahrhunderts sicher ist, ist die Entwicklung der Sensitivität nur für die nächsten Dekaden prognostizierbar, darüber hinaus aber wahrscheinlich ähnlich gerichtet.

### 5.3 Trockenstress für die Vegetation

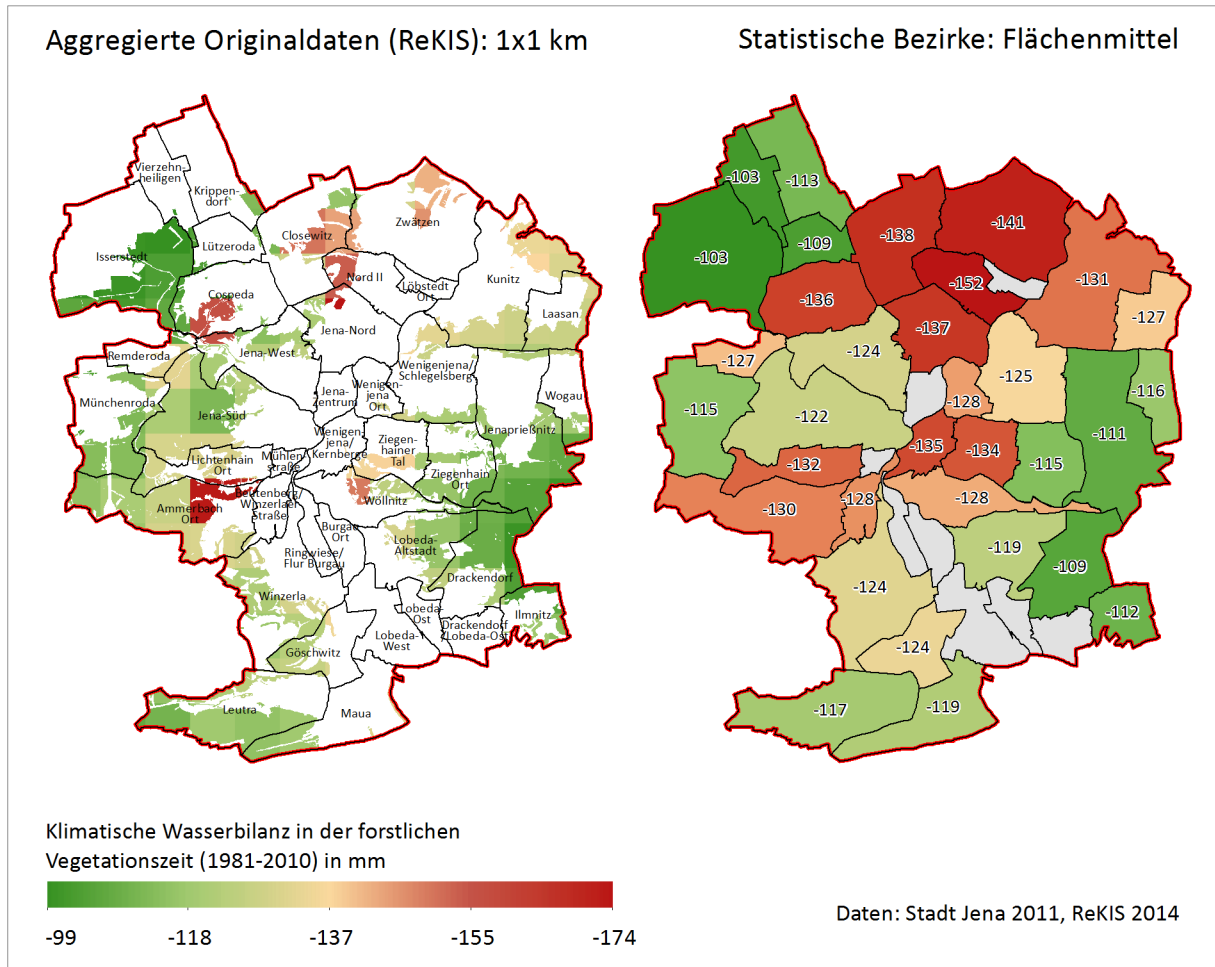
#### 5.3.1 Klimasignal

##### *Ackerflächen*

Als Klimasignal für Ackerflächen wurde die klimatische Wasserbilanz (KWB) in der ackerbaulichen thermischen Vegetationsperiode genutzt. Abbildung 42 (S. 118) zeigt diese auf den Ackerflächen Jenas rasterbasiert und als Flächenmittel in den statistischen Bezirken. Die KWB reicht dabei von -72 mm auf der Hochfläche bis -144 mm in der Tallage. Teilweise wird die grobe Auflösung der Klimadaten an scharfen Übergängen zwischen Rasterzellen sichtbar, wie z. B. in Closewitz und Kunitz. Abbildung 44a (S. 120) zeigt das klassifizierte Klimasignal in den statistischen Bezirken. Die geringsten KWB weisen die Bezirke in der geschützten Tallage auf, wo aufgrund der höheren Sommer- und Jahrestemperaturen eine stärkere Verdunstung besteht. Die höchste KWB tritt auf der Hochfläche im Nordwesten Jenas in den Bezirken Isserstedt und Vierzehnheiligen auf. Grau hinterlegte Bezirke weisen auf nicht vorhandene oder vernachlässigbar kleine Ackerflächen, unter 1 ha, hin.

Daten: Stadt Jena 2011, ReKIS 2014

Die KWB in der forstlichen, thermischen Vegetationszeit wurde als Klimasignal für die Waldflächen genutzt. Abbildung 43 (S. 119) zeigt die KWB in der Flächenkulisse der Waldgebiete und als Flächenmittel in den statistischen Bezirken. Erkennbar wird die grobe Auflösung des Klimasignals auch hier an den scharfen Pixelübergängen, z. B. im Bezirk Ammerbach-Ort. Der Wert der KWB reicht von -152 mm im Tal bis hin zu -103 mm auf den Hochflächen. In Abbildung 44b (S. 120) ist das klassifizierte Klimasignal für die Waldflächen in den statistischen Bezirken dargestellt. Wie bei den Ackerflächen sind auch hier die Bezirke mit der niedrigsten KWB vorrangig in den Tallagen zu finden (Nord II, Zwätzen, Jena-Nord), wo höhere Sommer- und Jahrestemperaturen für stärkere Verdunstung sorgen. Die Bezirke mit der besten KWB liegen auf der Hochfläche im Nordwesten des Stadtgebietes (Isserstedt, Vierzehnheiligen). Grau hinterlegte Bezirke weisen in beiden Abbildungen auf nicht vorhandene oder vernachlässigbar kleine Waldflächen, unter 1 ha, hin. Diese Bezirke wurden nicht bewertet.

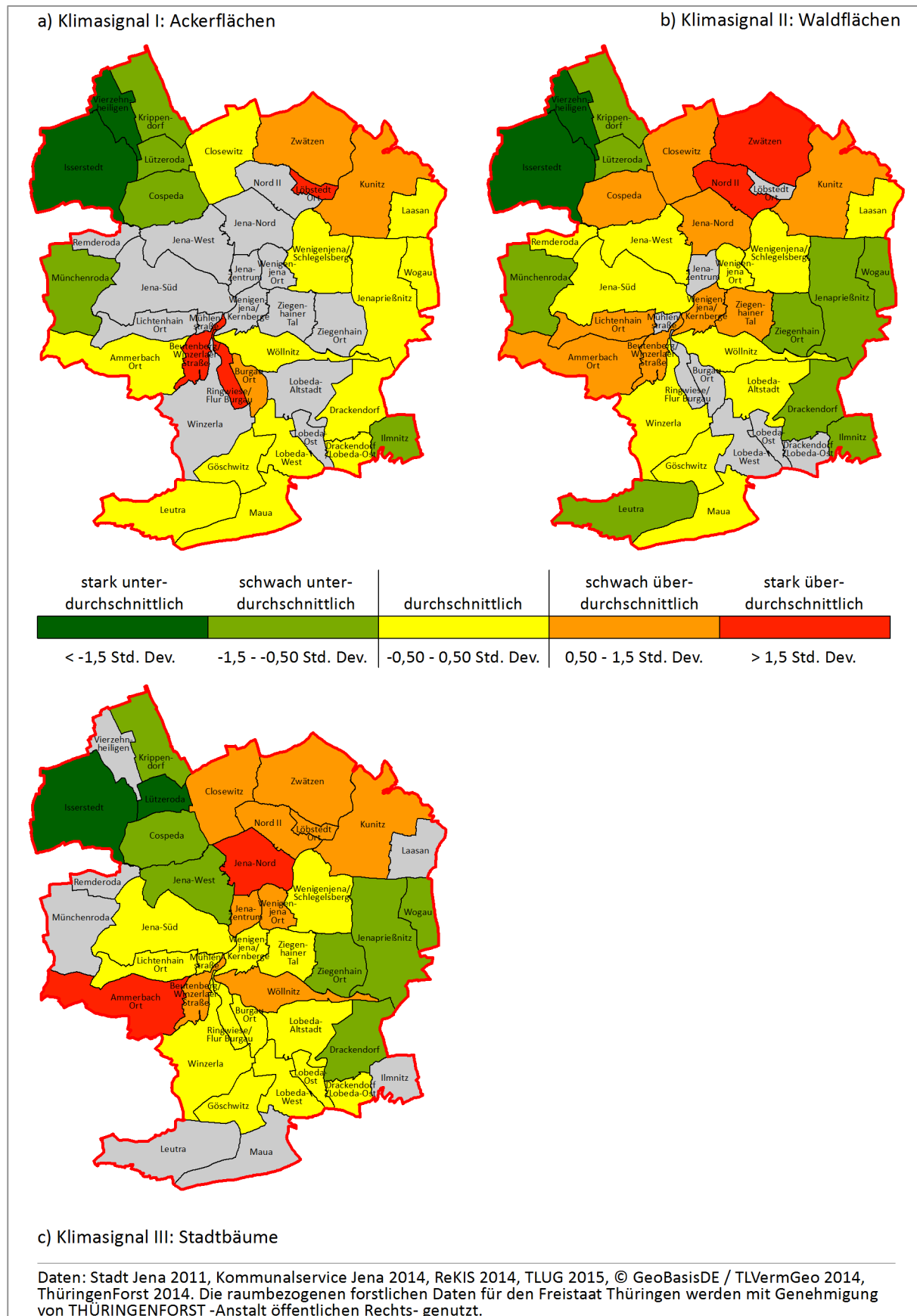


**Abbildung 43: Mittlere klimatische Wasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit im Untersuchungsgebiet Jena für die Klimaperiode 1981-2010. Klimadaten entstammen ReKIS. Für grau hinterlegte Bezirke war keine Bewertung möglich (eigene Darstellung)**

### Stadtbäume

Als Klimasignal für die Stadtbäume wurde ebenfalls die KWB in der forstlichen, thermischen Vegetationszeit genutzt. Im Stadtgebiet treten Werte von -98 mm bis -162 mm auf. Da die, der KWB zugrundeliegenden, Rasterdaten der potenziellen Verdunstung keine Landnutzung berücksichtigen, dürfte die KWB, aufgrund der höheren Temperaturen und damit stärkeren Verdunstung im bebauten Bereich, tendenziell niedriger sein. Dies bedeutet, dass die Einschätzung des Klimasignals aufgrund der genutzten Daten zu optimistisch ausfällt. Abbildung 44c (S. 120) illustriert, dass die Bezirke, deren Siedlungsbereiche in den Tallagen zu finden sind, die niedrigste Wasserbilanz aufweisen (Jena-Nord, Ammerbach-Ort, Nord II). Die höchsten Wasserbilanzen treten im Nordwesten (Isserstedt, Lützeroda) sowie Osten (Jenaprießnitz, Wogau) des Stadtgebietes auf. Grau hinterlegte Bezirke besitzen laut Stadtbaumkataster keine oder weniger als zehn Stadtbäume in kommunaler Verantwortung und wurden nicht näher betrachtet.





**Abbildung 44: Klimasignale für die Trockenstress-Teilklimawirkungen Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume in den statistischen Bezirken Jenas für die Klimaperiode 1981-2010. Klassifizierung nach Standardabweichung. Für grau hinterlegte Bezirke war keine Bewertung möglich (eigene Darstellung)**

Tabelle 10 stellt die ermittelten Daten für die Länge der Vegetationsperioden und Beträge der KWB in den Vegetationsperioden für die Flächennutzungen Acker, Wald und Ortslage gegenüber. Erwartungsgemäß ist die ackerbauliche Vegetationsperiode aufgrund der geringeren Temperaturschwelle mit im Mittel 239 Tagen am längsten. Auch fällt die Wasserbilanz im Vergleich am wenigsten negativ aus, da die Monate März und April noch innerhalb des feuchteren hydrologischen Winterhalbjahres liegen. Zwischen den Vegetationszeiten und Wasserbilanzen der Flächennutzungen Wald und Ortslage (Waldflächen, Stadtbäume) existieren nur geringe Unterschiede. Die längere Vegetationszeit und negativere Wasserbilanz für die Stadtbäume erklärt sich durch die Lage des Hauptsiedlungskörpers im Saaletal mit höheren Sommer- und Jahrestemperaturen und einer damit auch stärkeren Verdunstung.

**Tabelle 10: Ermittelte Kennwerte für die thermische Vegetationsperiode und die klimatische Wasserbilanz in der thermischen Vegetationsperiode für verschiedene Flächennutzungen im Stadtgebiet Jena für die Klimaperiode 1981-2010 (eigene Darstellung)**

Flächen-nutzung	Mittlerer Tag des Beginns	Mittlerer Tag des Endes	Mittlere Länge in Tagen	Mittlere klimatische Wasserbilanz in mm	Mittlere klimatische Wasserbilanz je Monat in mm
Acker	01. März	25. Oktober	239	-96	-12
Wald	17. April	15. Oktober	182	-122	-20
Ortslage	14. April	14. Oktober	184	-133	-22

### 5.3.2 Sensitivität

#### *Ackerflächen*

Für die Ermittlung der Sensitivität gegenüber Trockenstress wurde das pflanzenverfügbare Wasser in Form der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ( $nFKWe$ ) und die Größe der Ackerflächen herangezogen. Informationen zum kapillaren Aufstieg standen nicht zur Verfügung. Die Gleichsetzung von pflanzenverfügbarem Wasser und nutzbarer Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ist für die Ackerflächen im Auebereich der Saale unrealistisch, da hier kapillarer Aufstieg aufgrund des hochanliegenden Grundwasserspiegels gegeben sein dürfte. Im Ergebnis werden die Ackerflächen in der Saaleaue wahrscheinlich als zu trockenstresssensitiv angenommen. Abbildung 45a (S. 123) zeigt die Verteilung der Sensitivität im Stadtgebiet. Die guten Böden des Saaletals und seiner Nebentäler zeichnen sich bereits ohne Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs als unterdurchschnittlich sensitiv bzgl. des Trockenstress ab. Überdurchschnittlich sensitive Bezirke finden sich vor allem im Nordwesten (Closewitz, Cospeda, Lützeroda) und Südosten Jenas (Ilmnitz, Drackendorf) und sind meist das Ergebnis von großen Ackerflächen mit vergleichsweise geringer nutzbarer Feldkapazität im effektiven Wurzelraum. Grau hinterlegte Bezirke besitzen keine oder vernachlässigbar kleine Ackerflächen, unter 1 ha, und wurden nicht betrachtet.

### **Waldflächen**

Die Sensitivität der Waldflächen wird anhand der mittleren Klimaangepasstheit nach *KLAM-Wald* und der Größe der Waldfläche im statistischen Bezirk abgebildet. Abbildung 45b (S. 123) gibt Auskunft über die Verteilung der Sensitivität. Die Bezirke mit der höchsten Sensitivität im Stadtgebiet sind Jenaprießnitz, Isserstedt und Ammerbach-Ort aufgrund großer Waldareale bei trotzdem guter Klimaangepasstheit der Bestände. Die geringsten Sensitivitäten finden sich in den Bezirken Beutenberg/Winzerlaer Straße, Wenigenjena/Kernberge, Vierzehnheiligen und Maua infolge kleiner Waldareale und sehr guter Eignung der Bestände nach *KLAM-Wald*. Grau hinterlegte Bezirke besitzen keine oder vernachlässigbar kleine Waldflächen, unter 1 ha, und wurden hier nicht betrachtet.

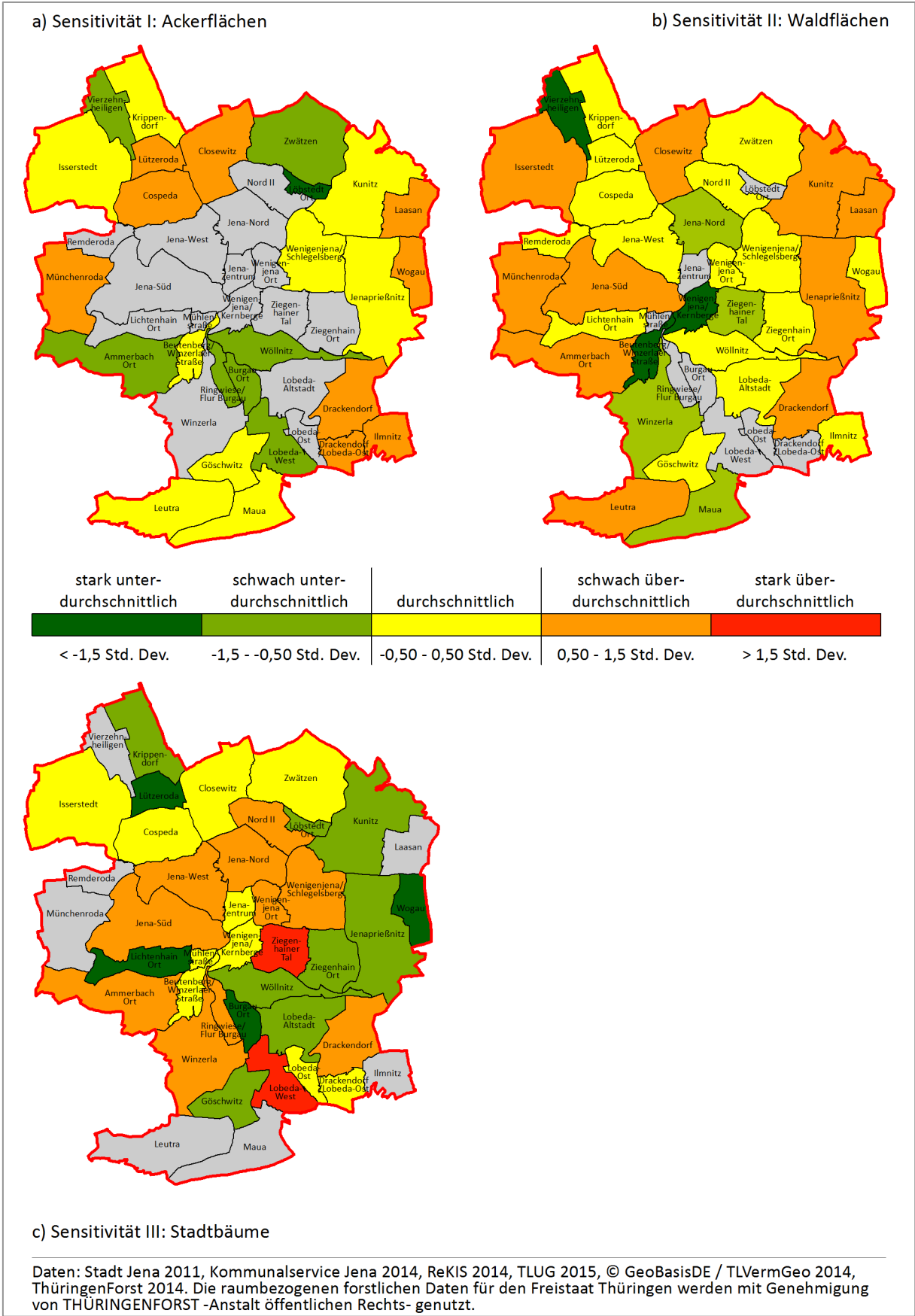
### **Stadtbäume**

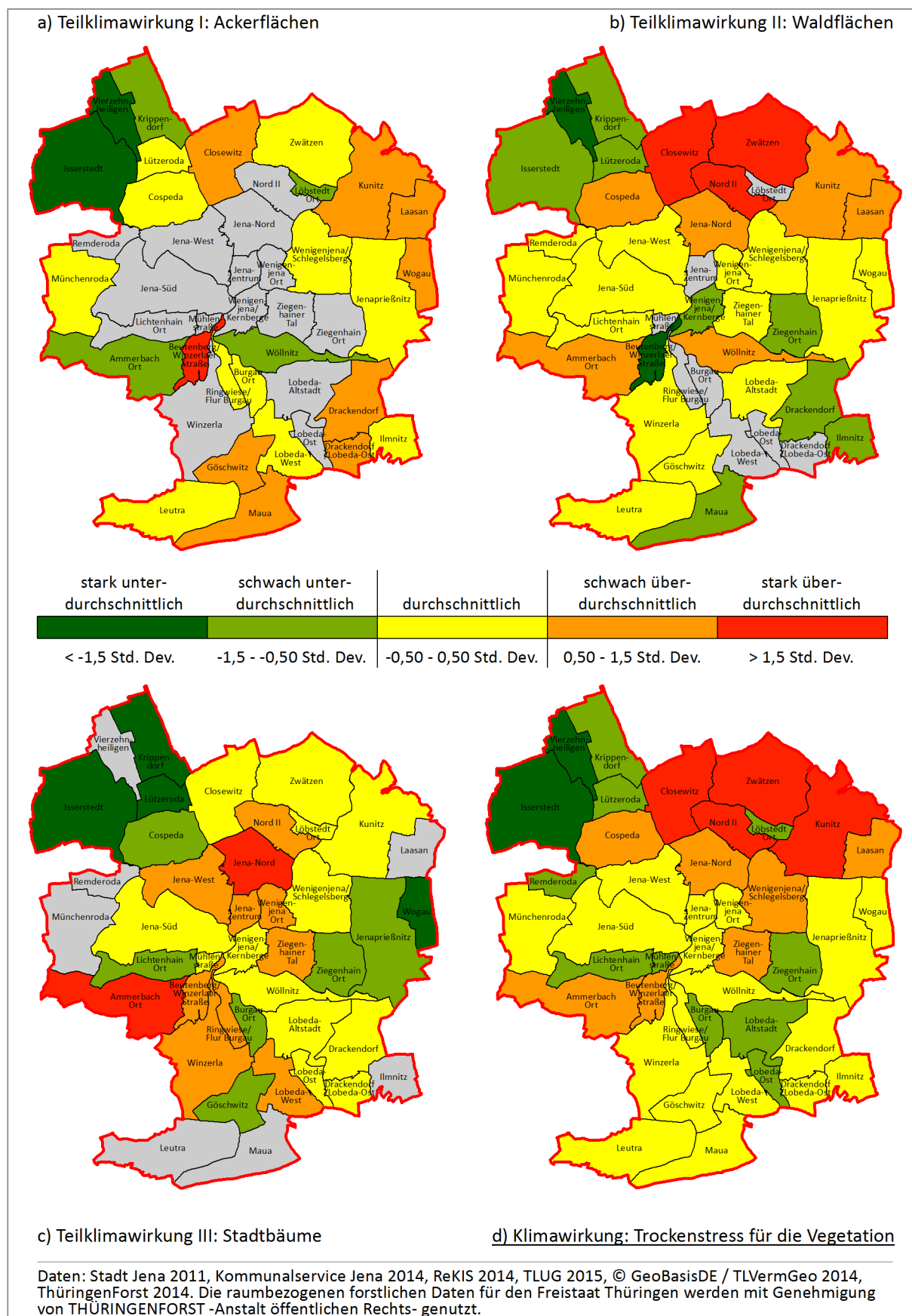
Die Sensitivität der Stadtbäume wurde, ähnlich der Sensitivität der Waldflächen, über die Eignung der Baumart nach *KLAM-Stadt* und die Anzahl an Stadtbäumen im statistischen Bezirk ermittelt. In Abbildung 45c (S. 123) ist die Sensitivität in den Bezirken Jena dargestellt. Hier sind die am stärksten sensiblen Bezirke die, die eine geringe Klimaangepasstheit (*KLAM-Stadt*-Eignung) und eher große Stadtbaumbestände aufweisen, wie z. B. Ziegenhainer Tal, Lobeda-West, Jena-West, Winzerla. Statistische Bezirke mit geringer Sensitivität, wie z. B. Wogau, Burgau-Ort, Lichtenhain-Ort oder Lützeroda, zeichnen sich durch eine gute Eignung nach *KLAM-Stadt* und geringe Bestände an Stadtbäumen aus. Statistische Bezirke ohne Stadtbäume im Baumkataster bzw. mit einer Anzahl unter zehn sind grau dargestellt.

### **5.3.3 Klimawirkung der Gegenwart**

Abbildung 46a-c (S. 124) zeigt die Teilklimawirkungen für Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume, die sich durch die Verknüpfung der Klimasignale und Sensitivitäten ergeben. Für alle drei Teilklimawirkungen zeigt sich vor allem der Nordwesten Jena mit unterdurchschnittlicher Klimawirkung (Isserstedt, Krippendorf, Lützeroda). Für die Ackerflächen entfaltet sich die stärkste Klimawirkung in den Bezirken Beutenberg/Winzerlaer Straße, aufgrund der schlechtesten KWB, sowie Closewitz, Kunitz und Laasan, infolge großer Ackerflächen mit geringer nutzbarer Feldkapazität. Die schwächsten Klimawirkungen im Stadtgebiet – sieht man von Bezirken ohne Ackerflächen ab – finden sich trotz großer Ackerflächen in Vierzehnheiligen, Isserstedt und Krippendorf wegen vergleichsweise guter KWB und nutzbarer Feldkapazitäten sowie in Wöllnitz und Ammerbach-Ort aufgrund geringer Ackerflächen.







**Abbildung 46: Teilklimawirkungen und Gesamtklimawirkung des Trockenstresses für die Vegetation in den statistischen Bezirken Jenas für die Klimaperiode 1981-2010. Klassifizierung nach Standardabweichung. Für grau hinterlegte Bezirke war keine Bewertung möglich (eigene Darstellung)**

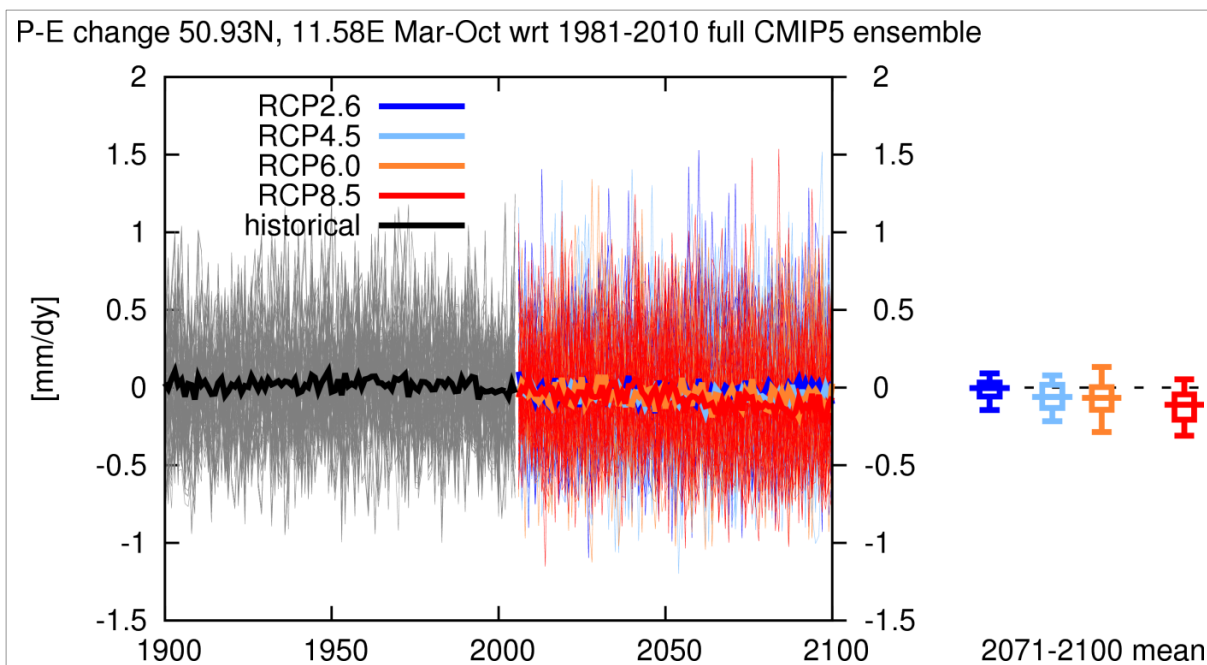
Abbildung 46b (S. 124) veranschaulicht die Klimawirkung des Trockenstress für Waldflächen. Die Bezirke mit der stärksten Klimawirkung sind Nord II, Zwätzen und Closewitz. Hier bewegen sich alle Eingangsvariablen (KWB, *KLAM-Wald-Eignung*, Waldfläche) im ungünstigsten Viertel der Verteilung. Statistische Bezirke mit unterdurchschnittlicher Klimawirkung weisen diese vor allem aufgrund einer besseren KWB auf, wie in Vierzehnheiligen, Isserstedt, Lützeroda oder Krippendorf, seltener durch bessere Eignung der Waldbestände und geringere Waldflächen, wie in den Bezirken Beutenberg/Winzerlaer Straße, Wenigenjena/Kernberge oder Maua. Für die Stadtbäume stellt Abbildung 46c (S. 124) die Klimawirkung in den statistischen Bezirken Jenas. Überdurchschnittlich hohe Klimawirkungen konzentrieren sich auf städtisch geprägte Bezirke, da hier die schlechtesten KWBs und die meisten Stadtbäume zu finden sind (Jena-Nord, Winzerla, Jena-West, Jena-Zentrum). Die Klimawirkung dürfte im städtischen Bereich noch stärker sein, da die KWB aufgrund der verfügbaren Daten zu hoch eingeschätzt wurde (vgl. Kapitel 5.3.1). Dass Ammerbach-Ort als dörflich geprägter Bezirk überdurchschnittlich hoch abschneidet, liegt am Zusammenspiel aus schlechter KWB und vergleichsweise geringer Klimaangepasstheit der Stadtbäume. Dies steht im Kontrast zu anderen dörflich geprägten Bezirken, die entweder keine Stadtbäume im Baumkataster aufweisen, wie Maua, Ilmnitz und Remderoda, oder eine unterdurchschnittliche Klimawirkung infolge besserer Klimaangepasstheit der Stadtbäume bei gleichzeitig höherer KWB erfahren, wie Wogau, Krippendorf oder Isserstedt.

### ***Gesamtklimawirkung Trockenstress***

Die drei Teilklimawirkungen Trockenstress auf Ackerflächen, auf Waldflächen sowie für Stadtbäume werden zu einer Gesamtklimawirkung zusammengefasst. Abbildung 46d (S. 124) zeigt die Gesamtklimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* in den statistischen Bezirken Jenas. Dabei weist der Norden und Nordosten des Stadtgebietes (Nord II, Closewitz, Zwätzen, Kunitz) überdurchschnittlich hohen Trockenstress auf, der vor allem aus der Kombination von hohem Trockenstress auf Acker- und Waldflächen entsteht. Der Nordwesten ist vor allem infolge einer vergleichsweise guten KWB unterdurchschnittlichem Trockenstress ausgesetzt (Vierzehnheiligen, Isserstedt, Lützeroda, Krippendorf). 18 von 41 statistische Bezirke zeigen durchschnittlichen Trockenstress, darunter auch innerstädtische bzw. verdichtete Bereiche (Jena-Zentrum, Jena-West, Wenigenjena-Ort, Winzerla, Lobeda-West). Deren überdurchschnittlicher Trockenstress für Stadtbäume (relativer Bezug) wird durch nicht vorhandenen bis durchschnittlichen Trockenstress auf Acker- und Waldflächen insgesamt ausgeglichen (absoluter Bezug).

### 5.3.4 Künftige Klimawirkung

Zur Beurteilung der Veränderung des Klimasignals wird der *Climate change atlas* verwendet. Abbildung 47 zeigt eine leichte Veränderung der KWB ( $P-E$ , net water flux) in der ackerbaulichen Vegetationsperiode, angenähert nach Tabelle 10 (S. 121) als Monate März bis Oktober, zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena. Zu sehen ist, dass die drei *RCP*-Szenarien *RCP4.5* (40 Modelle mit 101 Realisationen), *RCP6.0* (24 Modelle mit 46 Realisationen) und *RCP8.5* (37 Modelle mit 74 Realisationen) eine leichte Abnahme der täglichen KWB (mm/Tag) bis maximal 0,2 mm/Tag projizieren, während *RCP2.6* (31 Modelle mit 63 Realisationen) keine Veränderung zeigt.

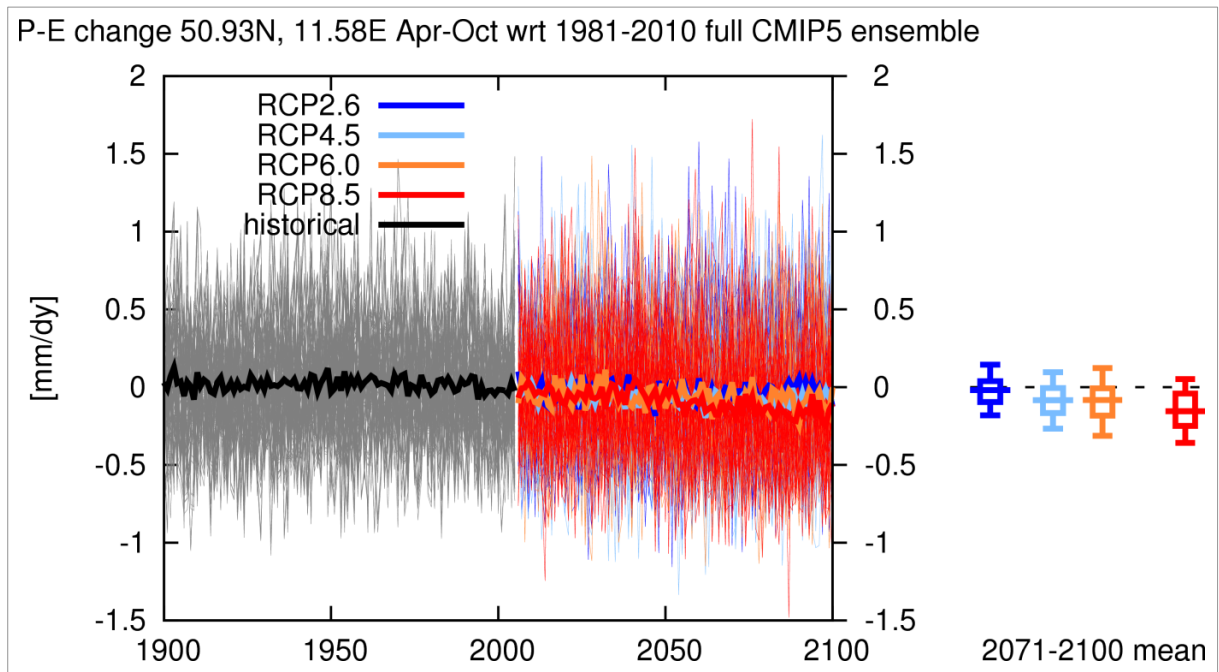


**Abbildung 47:** Veränderung der klimatischen Wasserbilanz ( $P-E$ , net water flux) in der ackerbaulichen Vegetationsperiode zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena (50,93 N, 11,58 E). Vegetationsperiode angenähert: Monate März bis Oktober (KNMI 2016b)

Auch für die KWB in der forstlichen Vegetationszeit, angenähert nach Tabelle 10 (S. 121) als Monate April bis Oktober, kann ein leichter Trend der Abnahme festgestellt werden (Abbildung 48, S. 127). Die drei *RCP*-Szenarien *RCP4.5* (40 Modelle mit 101 Realisationen), *RCP6.0* (24 Modelle mit 46 Realisationen) und *RCP8.5* (37 Modelle mit 74 Realisationen) zeigen eine Abnahme der täglichen KWB (mm/Tag) bis zu 0,2 mm/Tag zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena. Nur im Szenario *RCP2.6* (31 Modelle mit 63 Realisationen) wird keine Änderung der täglichen KWB projiziert.

Zudem ist eine Veränderung der maximalen Länge von Trockenperioden bis zum Ende des Jahrhunderts projiziert (Abbildung 49, S. 128). Der *Climate change atlas* erlaubt für den Pa-

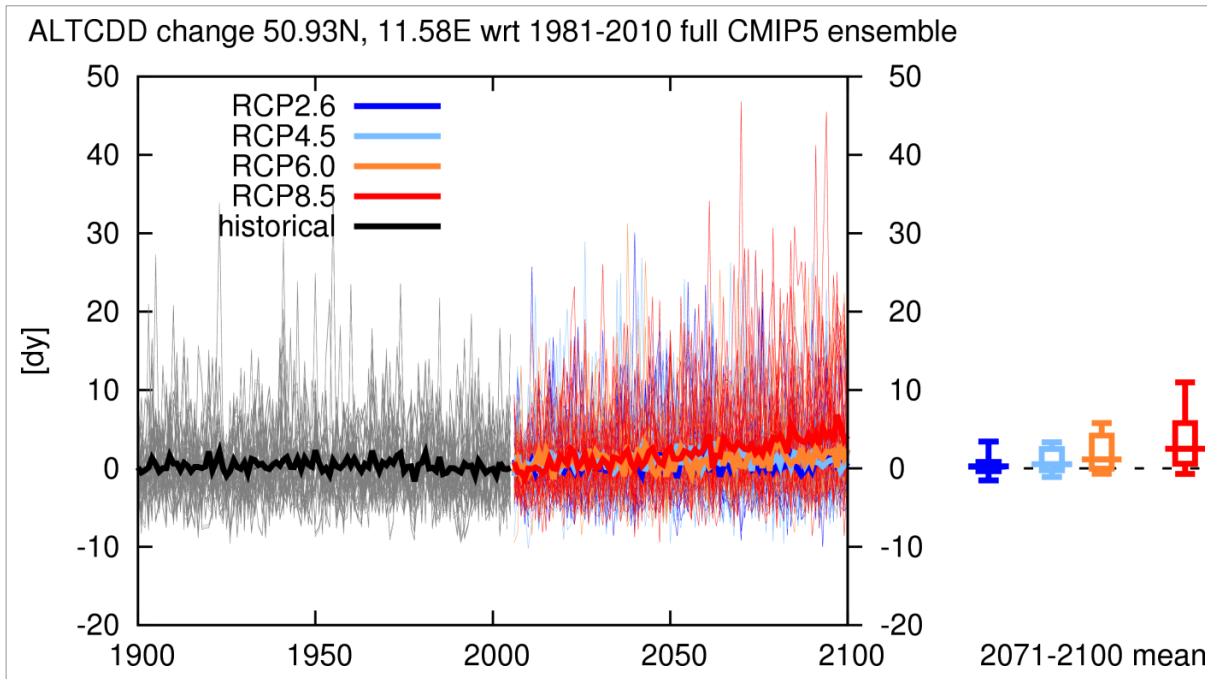
parameter keine jahreszeitliche Differenzierung. Es ist infolge der Zunahme sommerlicher Temperaturen und der Verdunstung aber wahrscheinlich, dass ein Großteil der Veränderungen auf sommerliche Trockenperioden zurückgeführt werden kann. Eine leichte Zunahme wird für die Szenarien *RCP4.5* (25 Modelle mit 50 Realisationen), *RCP6.0* (15 Modelle mit 27 Realisationen) und *RCP8.5* (24 Modelle mit 48 Realisationen) projiziert, die bis zu zwei Tage betragen kann, während *RCP2.6* (19 Modelle mit 42 Realisationen) keine Veränderung projiziert.



**Abbildung 48:** Veränderung der klimatischen Wasserbilanz (P-E, net water flux) in der forstlichen Vegetationszeit zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena (50,93 N, 11,58 E). Vegetationszeit angenähert: Monate April bis Oktober (KNMI 2016a)

Insgesamt kann für das Klimasignal in Form der KWB in der thermischen Vegetationsperiode davon ausgegangen werden, dass es sich in einer den Trockenstress für die Vegetation verstärkenden Weise verändern wird. Zwar ist die Entwicklung des Niederschlags noch mit Unsicherheiten behaftet, doch allein die sichere Zunahme der Temperaturen wird die KWB verringern, da sich die potenzielle Verdunstung erhöhen wird.

Eine Veränderung der Sensitivität in Form der Bodeneigenschaften kann für Acker- und Waldflächen bis Ende des Jahrhunderts ausgeschlossen werden. Die Sensitivität wird daher als konstant angenommen. Für die Stadtbäume könnten der Ausbau von Leitungsinfrastrukturen und eine zunehmende Flächenversiegelung zu schlechteren Wuchsbedingungen am Standort und damit zu einer höheren Sensitivität führen. Für Jena ist eine zunehmende Flächenversiegelung wahrscheinlich (vgl. Kapitel 5.2.4), womit tendenziell mehr Regenwasser oberflächlich abgeführt wird, und der Versickerung und damit den Bäumen nicht zur Verfügung steht.



**Abbildung 49:** Veränderung der maximalen Länge von Trockenperioden (consecutive dry-day index, CDD), als längste Periode zusammenhängender Tage mit weniger als 1 mm Niederschlag, zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena (50,93 N, 11,58 E) (KNMI 2016c)

Insgesamt kann von einer Verstärkung der Klimawirkung Trockenstress für die Vegetation in der Zukunft ausgegangen werden. Treiber der Veränderung wird vor allem die Erhöhung der Sommertemperaturen sein, die über eine erhöhte Verdunstung die KWB in der Vegetationsperiode verringern und somit das für die Pflanzen zur Verfügung stehende Wasser reduzieren wird. Die Sensitivität der Acker- und Waldflächen kann als konstant angesehen werden, während sie sich für Stadtbäume leicht erhöhen könnte.

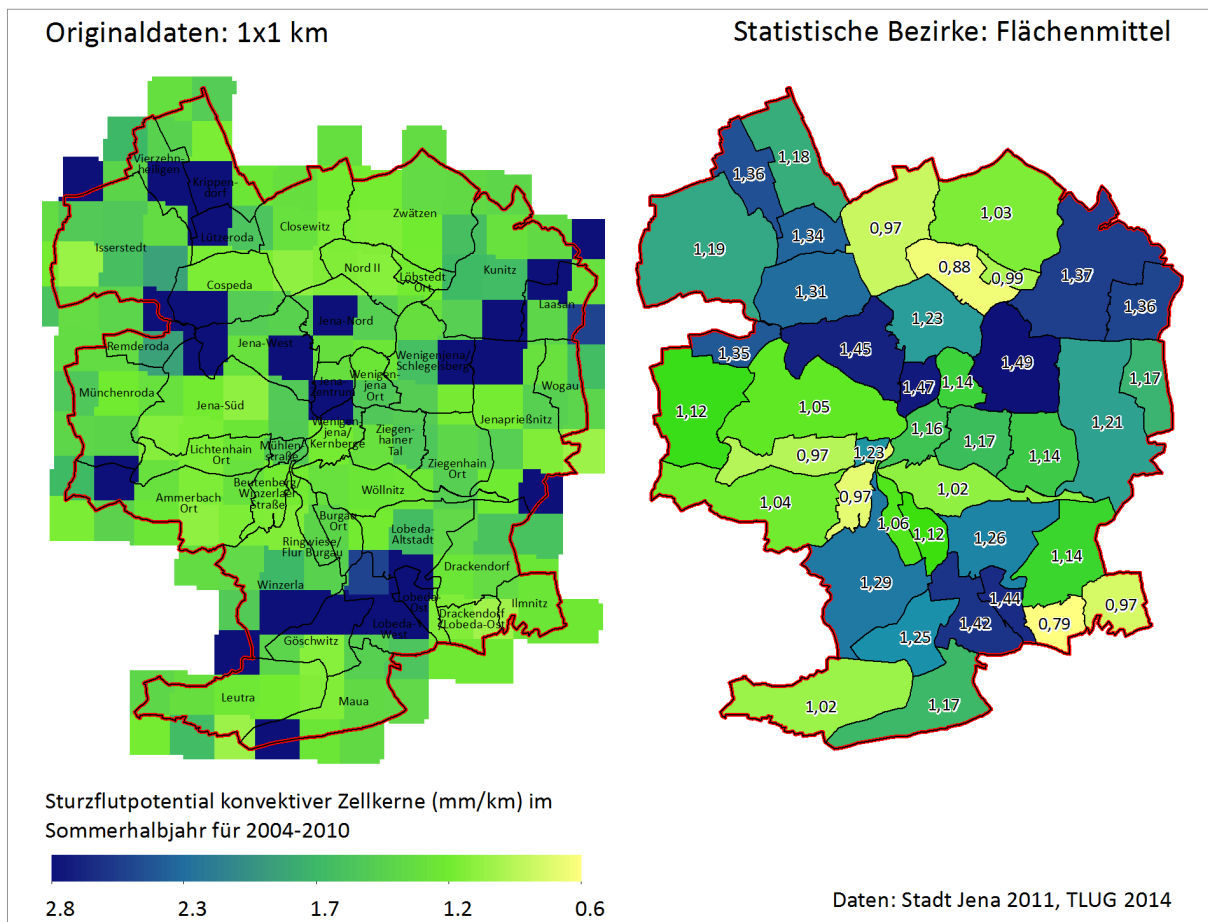
## 5.4 Überschwemmungen durch Starkregen

### 5.4.1 Klimasignal

Als Indikator für das Klimasignal wurde das Sturzflutpotenzial konvektiver Zellkerne im Sommerhalbjahr verwendet. In Abbildung 50 (S. 129) zeigt die rasterbasierte Auswertung ein sehr heterogenes Bild. Ob dieses auf den kurzen Betrachtungszeitraum (2004-2010) zurückzuführen ist oder die Verteilung der Starkniederschlagszellen so kleinräumig unterschiedlich ausfällt, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden und sollte an den fortgeschriebenen Daten zum Sturzflutpotenzial geprüft werden. Abbildung 51b (S. 131) stellt das klassifizierte Klimasignal in den statistischen Bezirken dar, was ein ähnlich heterogenes Bild zeigt. Die höchsten Werte für das Sturzflutpotenzial finden sich in den statistischen Bezirken Jena-Zentrum, We-nigenjena/Schlegelsberg, Jena-West, Lobeda-West und Lobeda-Ost. Die geringsten Sturzflut-



potenziale zeigen sich im Norden (Nord II, Closewitz, Zwätzen), Südosten (Drackendorf/Lobeda-Ost, Ilmitz) und Südwesten (Beutenberg/Winzerlaer Straße, Lichtenhain-Ort).



**Abbildung 50: Mittleres Sturzflutpotenzial konvektiver Zellkerne im Sommerhalbjahr (April-September) im Untersuchungsgebiet Jena für den Zeitraum 2004-2010. Daten bereitgestellt durch die Thüringer Klimaagentur / Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (eigene Darstellung)**

#### 5.4.2 Sensitivität

Die Sensitivität wird im vorliegenden Ansatz durch die flächenmäßige Ausdehnung der Überschwemmung und die durchschnittliche Überflutungshöhe in einem statistischen Bezirk charakterisiert. Abbildung 51a (S. 131) stellt die Verteilung der Sensitivität im Stadtgebiet Jenas dar. Überdurchschnittliche Werte zeigen vor allem statistische Bezirke entlang der Talachse des Saaletals, die gleichzeitig über einen hohen Versiegelungsgrad verfügen, z. B. Jena-Nord, Ringwiese/Flur Burgau, Lobeda-West, Zwätzen oder Nord II. Dies könnte am geringen durchschnittlichen Gefälle und den wenigen unversiegelten Flächen liegen, so dass sich hier vermehrt Wasser sammelt und größere zusammenhängende Überschwemmungsflächen bilden kann. Unterdurchschnittliche Sensitivitäten finden sich in Bezirken mit stärkerem Gefälle und geringem Versiegelungsgrad, in denen das Niederschlagswasser schneller abfließen und besser versickern kann. Dazu zählen Closewitz, Ilmnitz, Münchenroda, Remderoda und Laasan.

### 5.4.3 Klimawirkung der Gegenwart

Die Klimawirkung *Überschwemmung durch Starkregen* ergibt sich aus der geometrischen Aggregation der Indikatoren Sensitivität und Klimasignal. Abbildung 51c (S. 131) veranschaulicht die Klimawirkung in den statistischen Bezirken. Hierbei zeigen sich vier Bezirke mit stark überdurchschnittlicher Klimawirkung: Jena-Zentrum, Jena-West, Lobeda-West und Lobeda-Ost. Diese Bezirke weisen sowohl hohe Werte für die Sensitivität als auch für das Klimasignal auf, was zu einer überdurchschnittlichen Gesamtwertung führt. Auf der anderen Seite des Spektrums finden sich hauptsächlich ländlich geprägte Bezirke wie Closewitz, Ilm-nitz, Drackendorf/Lobeda-Ost, Münchenroda und Ziegenhain-Ort, die meist durch unterdurchschnittliche Werte bei Klimasignal und Sensitivität geprägt sind. Zur Validierung des Ergebnisses wurden Feuerwehreinsatzdaten der Jahre 2009-2013 ausgewertet. Dabei konnten 70 Einsätze zu 16 Starkregenereignissen zugeordnet werden. Abbildung 51d (S. 131) zeigt die Aufteilung auf die statistischen Bezirke. Dabei wurden die meisten Einsätze (20) für Jena-Nord registriert, gefolgt von Jena-West (7). Insgesamt zeigt sich eine geringe bis mittlere Übereinstimmung zur Klimawirkung. Vor allem für Lobeda-Ost und Lobeda-West wurden trotz hoher ermittelter Klimawirkung keine Feuerwehreinsätze verzeichnet. Die Gründe für die Abweichungen können vielfältig sein. Einerseits berücksichtigt das verwendete Wirkmodell kein Kanalnetz bei der Überschwemmungsmodellierung, so dass real eventuell mehr Wasser abgeführt wird als modelliert wurde. Andererseits erfolgte die Auswertung der Einsatzdaten anhand der Einsatzbeschreibungen, die nicht immer vollständig oder eindeutig waren. Somit kann es sein, dass einzelne Starkregeneinsätze nicht berücksichtigt worden.

### 5.4.4 Künftige Klimawirkung

Für das als Klimasignal verwendete Sturzflutpotenzial ergibt sich nach BRENDL et al. (2014) folgendes Bild: Bei Betrachtung der aus globalen Klimamodellen abgeleiteten Wetterlagen für das Szenario *RCP8.5* zeigt sich für die nahe Zukunft (2016-2045) eine Zunahme des Gefährdungspotenzials durch konvektive Unwetter inkl. des Starkniederschlags- und Sturzflutpotenzials. Für die Klimaperiode 2071-2100 wird aufgrund des Anstiegs feuchter Wetterlagen die Gefährdung noch deutlicher zunehmen. Bei Auswertung expliziter Simulationen konvektiver Ereignisse mit dem Regionalklimamodell CLM für die Periode 2071-2100 nimmt die projizierte Gefährdung durch Extremereignisse erheblich zu. Ein Anstieg der Gefährdung durch konvektive Unwetter inkl. Starkniederschlagsereignissen ist demnach künftig wahrscheinlich, auch wenn eine Quantifizierung unsicher bleibt.



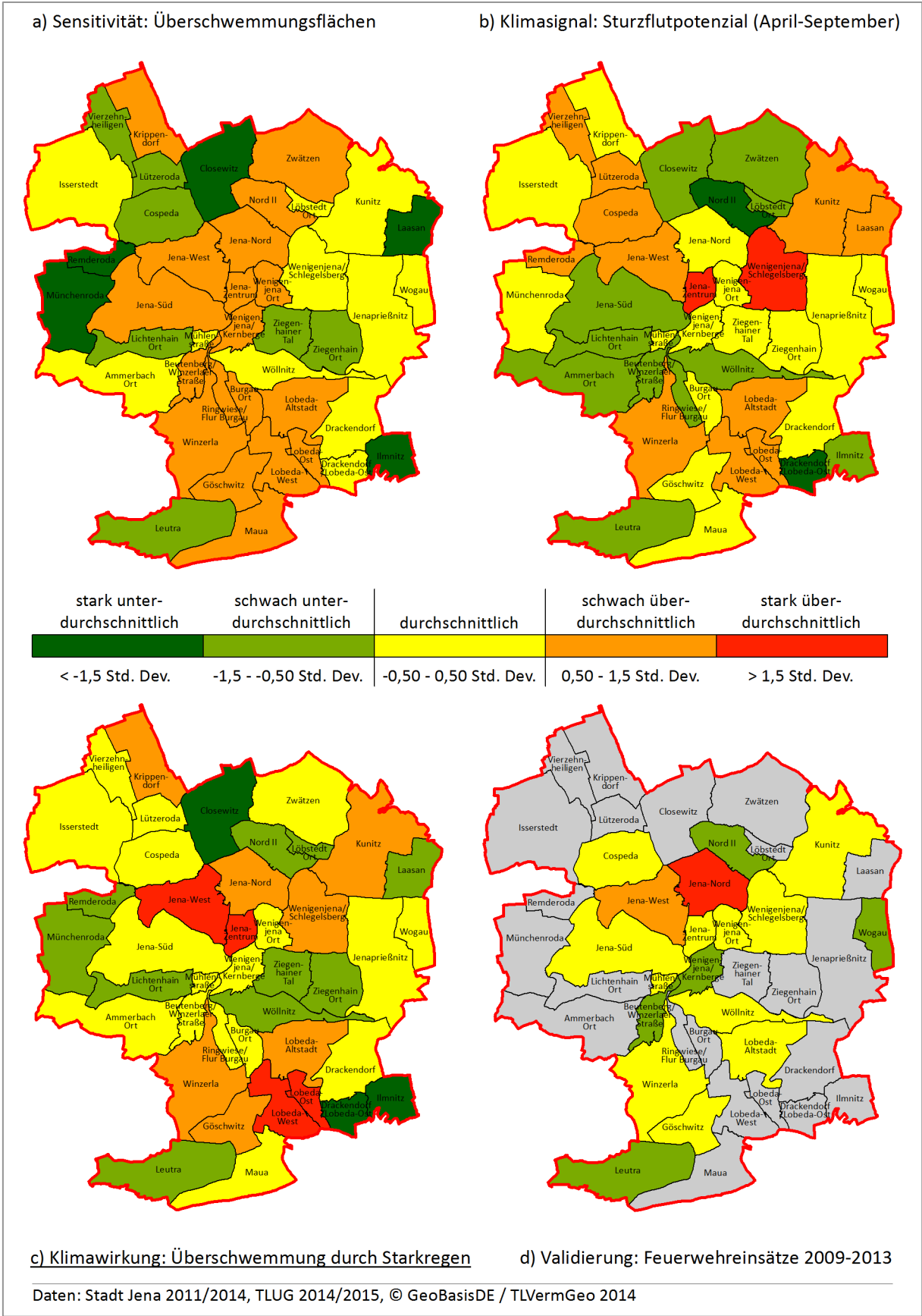


Abbildung 51: Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung für Überschwemmungen durch Starkregen in den statistischen Bezirken Jenas für die Klimaperiode 1981-2010 sowie Feuerwehreinsätze nach Starkregenerereignissen für die Jahre 2009-2013. Klassifizierung nach Standardabweichung (eigene Darstellung)

Weiterhin wurde die Veränderung des Klimasignals anhand des *Climate change atlas* beurteilt. Abbildung 52 stellt die Veränderung der mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit einem Niederschlag ab 20 mm zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 dar. Für Jena entsprechen 20 mm Tagesneiderschlag etwa dem 98. Perzentil der Regentage. Zu erkennen ist in Abbildung 52, dass für alle vier *RCP*-Szenarien eine leichte Zunahme der Anzahl der Tage projiziert wird, die sich jedoch unter eins bewegt: *RCP2.6* mit 19 Modellen und insgesamt 42 Realisationen, *RCP4.5* mit 25 Modellen und 50 Realisationen, *RCP6.0* mit 15 Modellen und 27 Realisationen, *RCP8.5* mit 24 Modellen und 48 Realisationen. Für den Kenntag der Anzahl der Tage mit einem Niederschlag ab 20 mm ist eine jahreszeitliche Differenzierung nicht möglich.

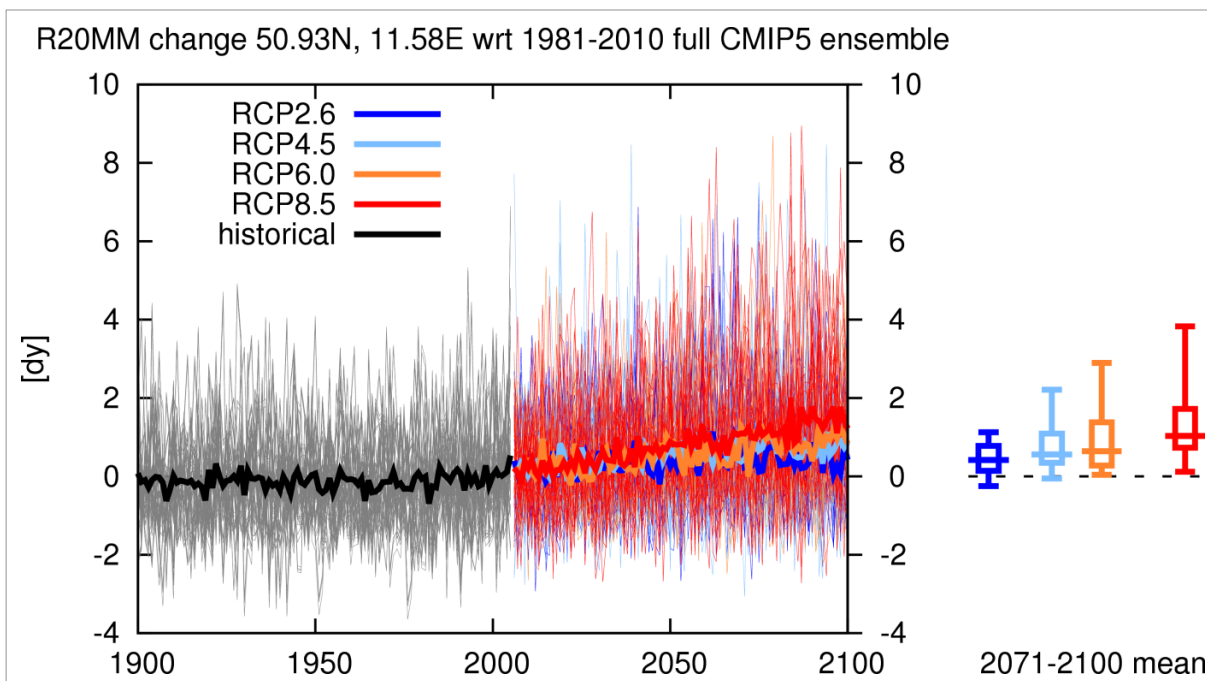
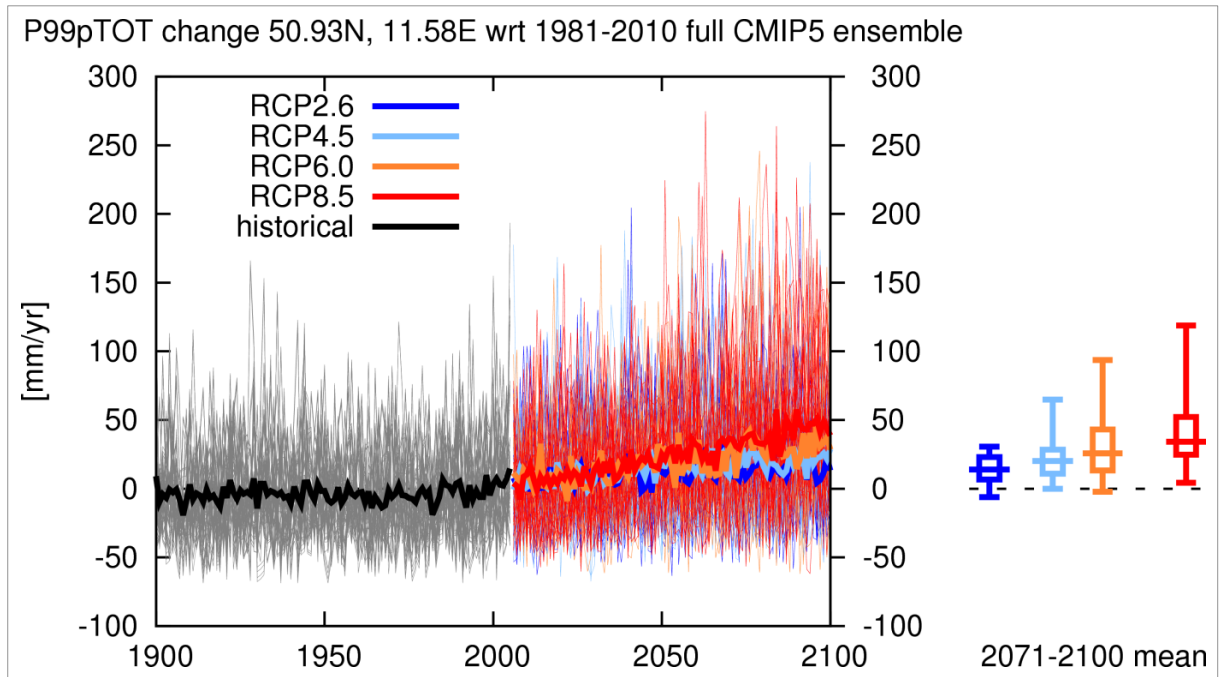


Abbildung 52: Veränderung der mittleren jährlichen Anzahl der Tage mit einem Niederschlag ab 20 mm zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena (50,93 N, 11,58 E) (KNMI 2016d)

Abbildung 53 (S. 133) zeigt die Veränderung der mittleren jährlichen Niederschlagssumme aller Tage mit einem Niederschlag über dem 99. Perzentil zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100. Zu sehen ist, dass für alle vier Szenarien *RCP2.6* (19 Modelle mit 42 Realisationen), *RCP4.5* (25 Modelle mit 50 Realisationen), *RCP6.0* (15 Modelle mit 27 Realisationen) und *RCP8.5* (24 Modelle mit 48 Realisationen) ein Anstieg der Gesamtmenge des Niederschlags der Tage über dem 99. Perzentil projiziert wird, der sich etwa zwischen 10 und 30 mm/Jahr bewegt.



**Abbildung 53:** Veränderung der mittleren jährlichen Niederschlagssumme aller Tage mit einem Niederschlag über dem 99. Perzentil zwischen den Klimaperioden 1981-2010 und 2071-2100 im Bereich Jena (50,93 N, 11,58 E) (KNMI 2016e)

Die Sensitivität der Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* wurde über die flächenmäßige Ausdehnung der Überschwemmung und die durchschnittliche Überflutungshöhe charakterisiert. Eine mögliche künftige Veränderung der Sensitivität ist hauptsächlich an eine Veränderung der Landnutzung, insbesondere der Versiegelung, gekoppelt. Wie in Kapitel 5.2.4 dargestellt wurde, ist ein deutlicher Trend der Zunahme versiegelter Flächen für Jena gegeben (vgl. Abbildung 41, S. 117), der aufgrund des Wachstums der Stadt wahrscheinlich weiter anhalten wird. Damit ist eine Zunahme versickerungsfähiger Flächen in der Ortslage, die das Starkniederschlagswasser aufnehmen könnten, in den nächsten Jahren, und vielleicht Jahrzehnten, aller Voraussicht nach nicht gegeben. Die Zunahme der versiegelten Fläche und der Wachstumstrend Jenas sprechen insgesamt für eine Zunahme der Sensitivität hinsichtlich Überschwemmungen durch sommerliche Starkregen.

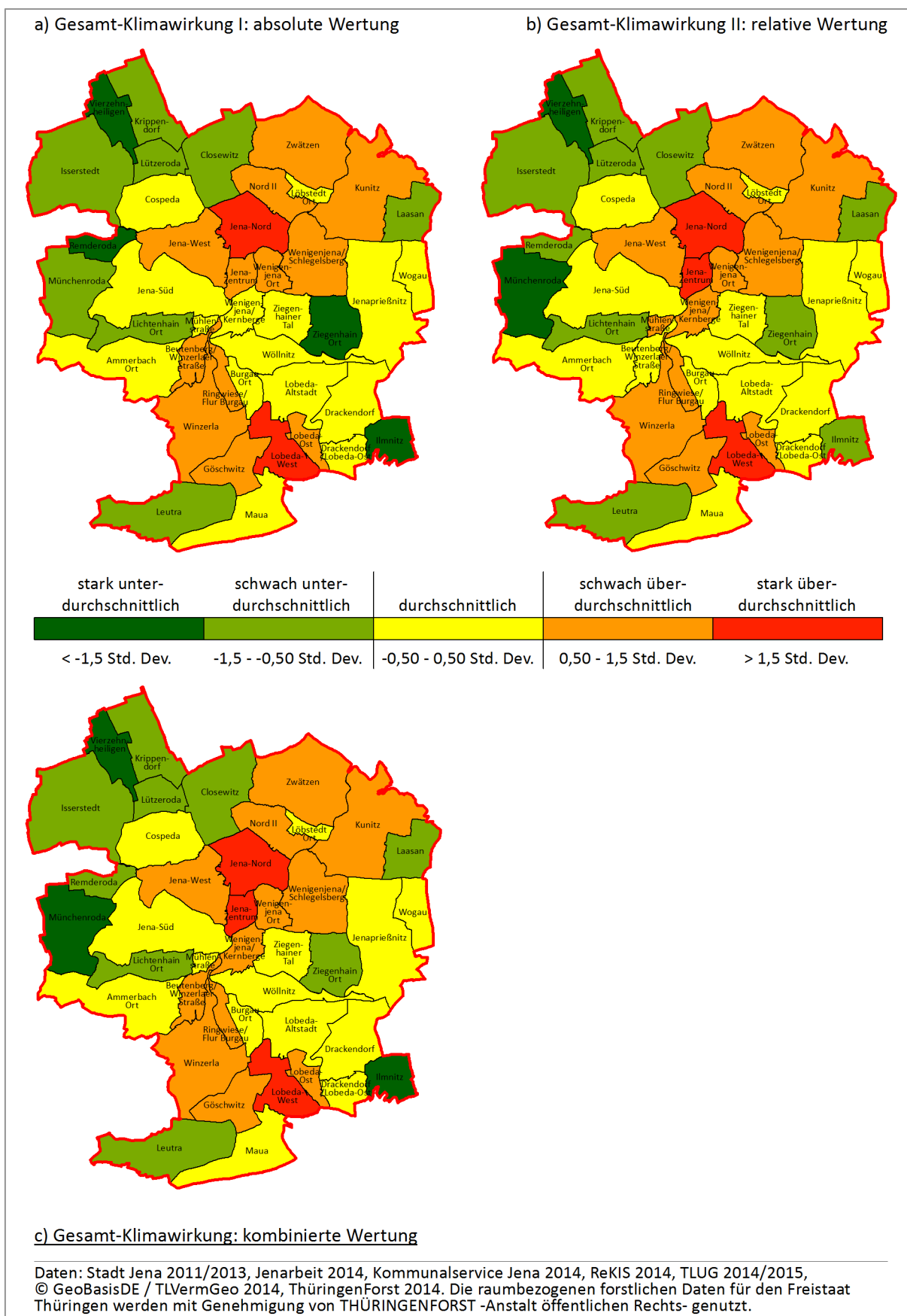
Die vorausgegangenen Ausführungen legen eine künftige Verstärkung der Klimawirkung nahe. So deuten Projektionen auf eine Verstärkung des Klimasignals hin, u. a. die Zunahme des Gefährdungspotenzials durch konvektive Unwetter in Thüringen, inkl. des Sturzflutpotenzials. Die Sensitivität in Form der Landnutzung wird im besten Falle gleich bleiben. Wahrscheinlicher ist jedoch eine Fortführung des Trends der weiteren Flächenversiegelung. Insgesamt ist mit einer künftigen Zunahme der Klimawirkung von *Überschwemmungen durch Starkregen* zu rechnen.

## 5.5 Gesamtklimawirkung

### 5.5.1 Gegenwart

Die Klimawirkungen *Wärmebelastung für die Bevölkerung*, *Trockenstress für die Vegetation* und *Überschwemmungen durch Starkregen* wurden zum Indikator Gesamtklimawirkung aggregiert und dabei im Bezirk vorkommende Klimawirkungen und deren Stärke sowie nicht vorhandene Klimawirkungen im Sinne eines Vorteils berücksichtigt. Abbildung 54a-c (S. 135) zeigt die absolute, relative und kombinierte Gesamtklimawirkung in den statistischen Bezirken Jenas für die Klimaperiode 1981-2010. Dabei wird deutlich, dass sich die Karten nur leicht unterscheiden. Dies erklärt sich dadurch, dass in den meisten statistischen Bezirken die gleichen (Teil-)Klimawirkungen auftreten. Unterschiede ergeben sich nur durch das unterschiedliche Vorhandensein der Teilklimawirkungen des *Trockenstress für die Vegetation*, da nicht alle statistischen Bezirke mit Ackerflächen, Waldflächen oder Straßenbäumen ausgestattet sind. In der Folge sind absolute und relative Gesamtklimawirkung für die meisten statistischen Bezirke ähnlich und damit auch die kombinierte Gesamtklimawirkung als arithmetisches Mittel beider Größen. Stärkere Abweichungen zwischen absoluter, relativer und kombinierter Gesamtklimawirkung stellen sich erst ein, wenn Klimawirkungen einbezogen werden, die auf wenige statistische Bezirke im Stadtgebiet begrenzt sind, z. B. *sommerliches Niedrigwasser an Vorflutern* oder *Erosion auf Ackerflächen durch Starkregen*.

Bei der Auswertung zeigen sich große Unterschiede zwischen den statistischen Bezirken Jenas. Bei der kombinierten Gesamtklimawirkung weisen Jena-Zentrum, Jena-Nord und Lobeda-West die höchsten Werte für die Gegenwart (1981-2010) auf. Als städtische Verdichtungsräume stehen sie in starkem Kontrast zu den ländlich geprägten Bezirken Münchenroda, Vierzehnheiligen und Ilmnitz, die die geringste Gesamtklimawirkung aufweisen. Auch eine schwach unterdurchschnittliche Gesamtklimawirkung findet sich vor allem in den ländlich geprägten Bezirken wie Laasan, Leutra oder Closewitz, während eine schwach überdurchschnittliche Gesamtklimawirkung häufig in Bezirken mit städtischem Charakter wie Nord II, Jena-West oder Winzerla anzutreffen ist. Dies unterstreicht die Rolle von Einflussfaktoren wie Einwohnerzahl (städtische vs. ländliche Bezirke), Baustruktur (Blockbebauung vs. Einfamilienhäuser) und Lage im Gelände (Tallage vs. Hochfläche) für die Ausprägung der untersuchten Klimawirkungen. Würden stärker naturzentrierte Klimawirkungen einbezogen, z. B. *Erosion auf Ackerflächen durch Starkregen* oder *Waldschäden durch Windwurf*, würden Bezirke mit überdurchschnittlichen Klimawirkungen stärker in die ländlichen Bezirke zu finden sein.



**Abbildung 54: Absolute, relative und kombinierte Gesamtklimawirkung in den statistischen Bezirken Jenas für die Klimaperiode 1981-2010. Klassifizierung nach Standardabweichung (eigene Darstellung)**

Tabelle 11 (S. 137) stellt die einzelnen Klimawirkungen für alle statistischen Bezirke Jenas dar. Diese sind jeweils entsprechend ihres Indikatorwertes mit Rängen versehen und den Karten vergleichbar eingefärbt. Grau hinterlegt sind Bezirke ohne vorhandene Teilklimawirkungen für den *Trockenstress für die Vegetation*. Die Teilklimawirkungen wurden sowohl einzeln als auch aggregiert zur Gesamtklimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* aufgeführt. Die letzten drei Spalten enthalten die absolute, relative und kombinierte Gesamtklimawirkung und illustrieren die Unterschiede zwischen den Wertungsarten. Auch können die Tabellenzeilen einzeln im Sinne einer Kurzcharakterisierung des statistischen Bezirks mit Ampeloptik genutzt werden, ähnlich der *Betroffenheitssignatur* im *JenKAS*-Projekt (KURMUTZ et al. 2012, vgl. Abbildung 55).

Bezirk	Wärmebelastung	Trockenstress	Überschwemmungen	Gesamtwirkung
Nord II				

**Abbildung 55: Kurzcharakterisierung eines statistischen Bezirks in Bezug auf vorhandene Klimawirkungen. Farbgebung entspricht den Karten (eigene Darstellung)**

### 5.5.2 Künftige Entwicklung

Abbildung 54c (S. 135) und Tabelle 11 (S. 137) können als Bestandsaufnahme zu den Klimawirkungen in der Gegenwart (1981-2010) dienen. Wichtig zur Ableitung von Anpassungsmaßnahmen ist jedoch auch die mögliche künftige Entwicklung der Klimawirkungen. Derzeit sind keine räumlich ausreichend genauen und belastbaren Daten verfügbar, um Analysekarten für einen künftigen Betrachtungszeitraum, wie z. B. 2021-2050 oder 2071-2100, auf Ebene der statistischen Bezirke Jenas vorzulegen. Daher sollte vorerst pragmatisch davon ausgegangen werden, dass die räumlichen Verteilungsmuster der Klimawirkungen auch künftig erhalten bleiben, jedoch die Stärke der Klimawirkungen zunehmen wird. Anstatt einer räumlich differenzierten Analyse wurde anhand von Trends der verwendeten Klimasignale und Sensitivitäten versucht, eine Entwicklung der Klimawirkungen qualitativ abzuschätzen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 (S. 138) zusammengefasst. Für fast alle Klimasignale und Sensitivitäten wird es künftig zu einer Veränderung kommen, die die Klimawirkung ungünstig beeinflusst. Einzig die Bodeneigenschaften auf Acker- und Waldflächen können als gleichbleibend angenommen werden. Somit ist eine Zunahme bzw. Verstärkung für alle untersuchten Klimawirkungen wahrscheinlich. Für die Gesamtklimawirkung in den statistischen Bezirken bedeutet dies, dass eine Verstärkung künftig ebenso wahrscheinlich ist.

**Tabelle 11: Klimawirkungen in den statistischen Bezirken Jenas für die Klimaperiode 1981-2010. Ranking: 1 = stärkste bzw. 41 = geringste Klimawirkung; Farbgebung entspricht den Karten (eigene Darstellung)**

Statistischer Bezirk	Wärmebelastung für die Bevölkerung	Trockenstress für die Vegetation				Überschwemmungen durch Starkregen	Abso-lute	Rela-tive	Kombi-nierte
		auf Acker-flä-chen	für Wald-flä-chen	für Stadt-bäume	Gesamt		Gesamtklimawirkung		
Ammerbach-Ort	30	21	4	2	6	27	20	25	22
Beutenberg/ Winzerlaer Straße	10	1	32	6	7	28	12	16	14
Burgau-Ort	9	19	-	30	36	12	16	18	16
Closewitz	35	2	3	18	2	41	31	36	33
Cospeda	26	12	6	27	11	26	24	26	26
Drackendorf	28	8	27	21	15	21	21	24	24
Drackendorf/ Lobeda-Ost	14	6	-	22	17	39	26	23	25
Göschwitz	18	9	16	25	14	8	7	12	11
Ilmnitz	29	10	29	-	29	40	40	39	39
Isserstedt	32	25	30	31	40	19	33	34	34
Jena-Nord	3	-	8	1	5	6	1	2	1
Jenaprießnitz	31	13	22	26	24	18	27	28	27
Jena-Süd	19	-	13	12	18	22	17	17	18
Jena-West	13	-	15	11	19	3	5	4	4
Jena-Zentrum	1	-	-	10	22	1	3	1	3
Krippendorf	39	22	28	32	37	10	30	32	31
Kunitz	25	3	5	19	4	9	8	15	13
Laasan	41	4	7	-	8	30	32	30	30
Leutra	37	16	18	-	25	35	36	35	35
Lichtenhain-Ort	24	-	12	29	34	37	34	31	32
Lobeda-Altstadt	23	-	20	24	30	11	22	20	20
Lobeda-Ost	5	-	-	17	32	4	14	5	7
Lobeda-West	2	20	-	5	16	2	2	3	2
Löbstedt Ort	12	23	-	15	31	29	23	21	21
Lützeroda	38	18	31	34	39	25	35	37	36
Maua	20	7	26	-	23	13	19	19	19
Mühlenstraße	8	-	-	23	35	14	18	13	17
Münchenroda	34	17	19	-	27	38	37	41	41
Nord II	6	-	1	3	1	32	10	6	8
Remderoda	36	-	17	-	33	33	39	33	37
Ringwiese Flur Burgau	7	14	-	8	13	17	13	10	12
Vierzehn- heiligen	40	26	33	-	41	24	41	40	40
Wenigenjena/ Kernberge	11	-	24	16	28	15	15	14	15
Wenigenjena/ Schlegelsberg	16	15	10	14	9	7	4	9	5
Wenigenjena-Ort	4	-	14	7	12	16	9	7	9
Winzerla	15	-	21	9	20	5	11	8	10
Wogau	27	5	23	33	26	23	28	27	28
Wöllnitz	22	24	9	20	21	34	29	29	29
Ziegenhain-Ort	33	-	25	28	38	36	38	38	38
Ziegenhainer Tal	21	-	11	4	10	31	25	22	23
Zwätzen	17	11	2	13	3	20	6	11	6



**Tabelle 12: Künftige Entwicklung von Klimasignal, Sensitivität und Klimawirkung für die untersuchten Klimawirkungen in Jena (eigene Darstellung)**

<b>Klimawirkung</b>	<b>Veränderung des Klimasignals und Auswirkung</b>	<b>Veränderung der Sensitivität und Auswirkung</b>	<b>Veränderung der Klimawirkung</b>
Wärmebelastung für die Bevölkerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme der maximalen täglichen bodennahen Lufttemperatur (Negativ)</li> <li>• Zunahme der Anzahl an Tagen mit Maximaltemperatur über dem heutigen 90. Perzentil (Negativ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme besonders hitzesensitiver Bevölkerungsgruppen (Negativ)</li> <li>• Zunahme des Wärmeinseleffektes (Negativ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme der Klimawirkung</li> </ul>
Trockenstress für die Vegetation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abnahme der klimatischen Wasserbilanz in der ackerbaulichen Vegetationsperiode (Negativ)</li> <li>• Abnahme der klimatischen Wasserbilanz in der forstlichen Vegetationsperiode (Negativ)</li> <li>• Zunahme der Länge von Trockenperioden (Negativ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichbleibende Bodeneigenschaften auf Acker- und Waldflächen (Neutral)</li> <li>• Verschlechterung der Wuchsbedingungen für Stadtbäume (Negativ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme der Klimawirkung</li> </ul>
Überschwemmungen durch Starkregen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme der jährlichen Anzahl der Tage mit Niederschlag von 20 mm oder mehr (Negativ)</li> <li>• Zunahme der jährlichen Niederschlagssumme der Regentage über dem 99. Perzentil (Negativ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme der Flächenversiegelung (Negativ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zunahme der Klimawirkung</li> </ul>

## 5.6 Planungshinweise zur Klimaanpassung

### 5.6.1 Flächenkulisse

Für die kartografische Darstellung von flächen- und punkthaften Planungshinweisen wurde die Betrachtungsebene der statistischen Bezirke verlassen und die Methoden auf die Ebene der konkreten Flächen angewendet. Dabei wurden die Eingangsdaten ohne eine Flächenmitteilung auf Bezirksebene in ihrer ursprünglichen räumlichen Auflösung verwendet.

#### *Wärmebelastung für die Bevölkerung*

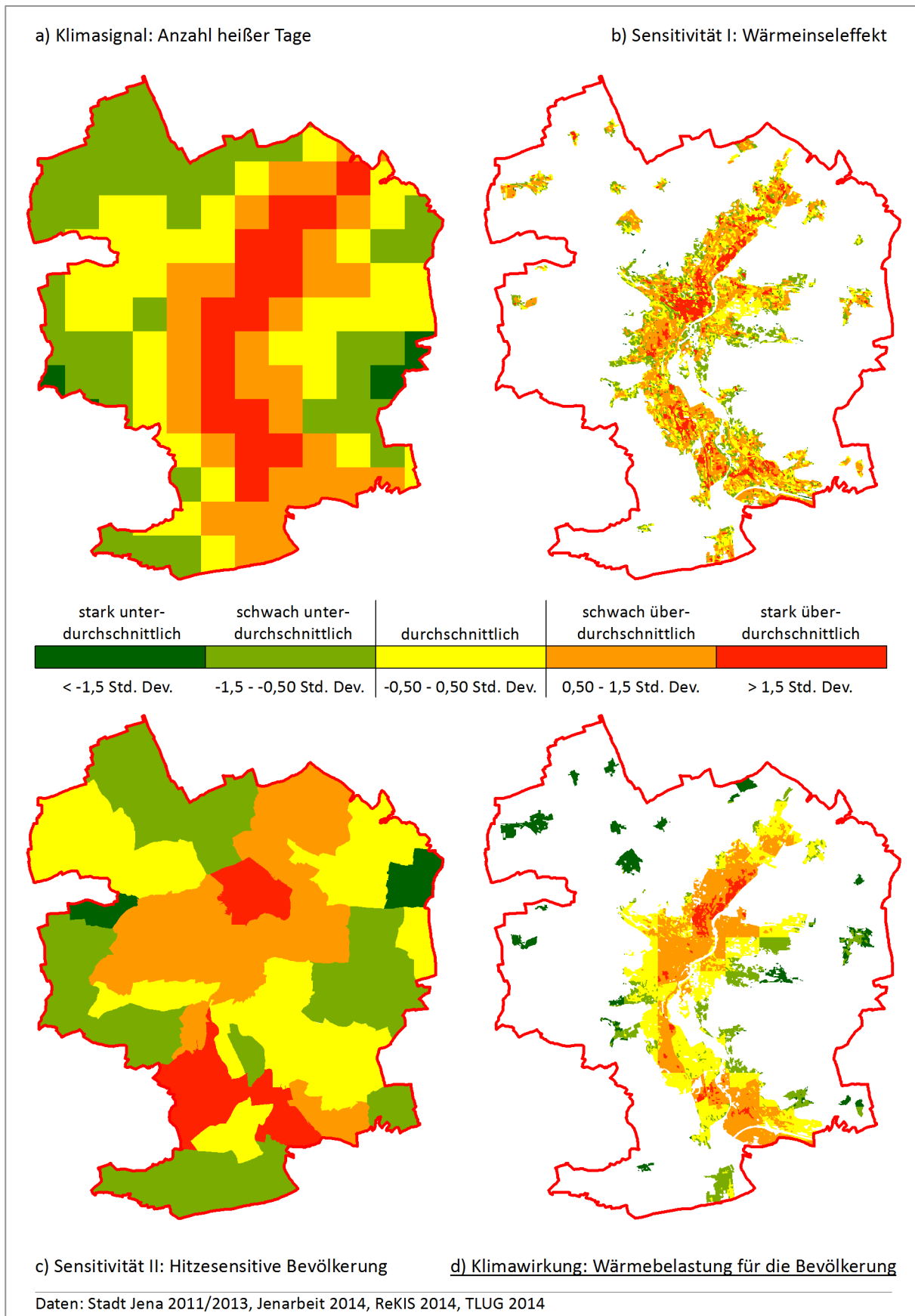
Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung der *Wärmebelastung für die Bevölkerung* auf Ebene der Einzelflächen sind in Abbildung 56a-d (S. 140) dargestellt. Für das Klimasignal ist der Verlauf des Saaletals trotz der groben Auflösung von 1.000 m deutlich erkennbar und weist die höchste Anzahl Heißer Tage auf, während auf den randlichen Hochflächen die geringste Anzahl Heißer Tage auftritt. Der Detailgrad des Subindikators Wärmeinseleffekt ist dagegen aufgrund der guten räumlichen Auflösung des Quelldatensatzes zur Versiegelung sehr hoch, so dass sich die größten Wärmeinseln im Stadtzentrum, Jena-Nord sowie in Industrie- und Gewerbegebieten abzeichnen. Da für die hitzesensitive Bevölkerung nur Daten auf Ebene der statistischen Bezirke vorliegen, existiert im Ergebnis nur eine sehr grobe räumliche



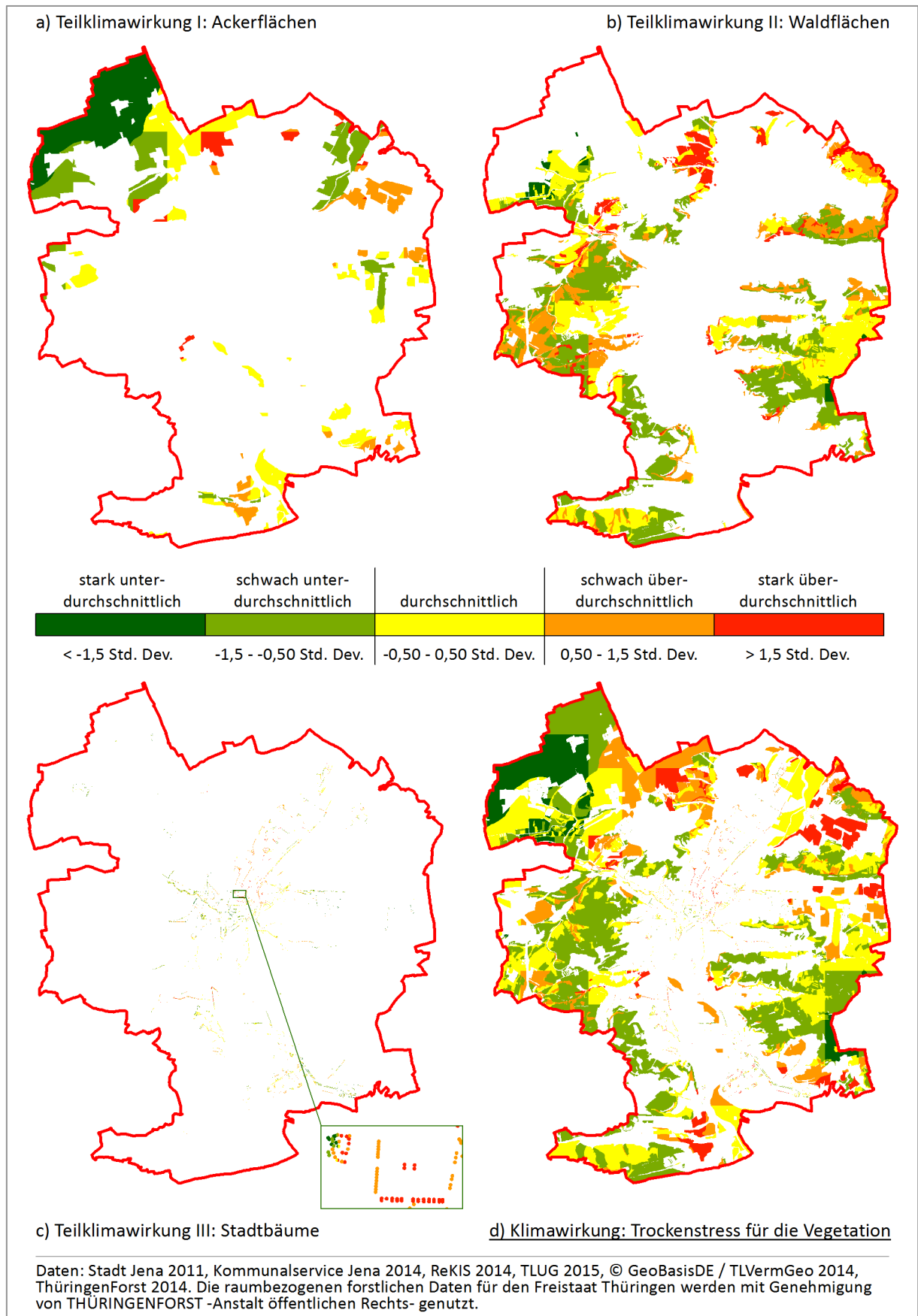
Auflösung für den zweiten Subindikator der Sensitivität. Erkennbar wird die hohe soziale Vulnerabilität in Bereichen mit Großwohnsiedlungen sowie städtischer Verdichtung. Die Klimawirkung als Ergebnis zeigt Abbildung 56d (S. 140). Es werden die unterschiedlichen Auflösungen der Eingangsdaten sichtbar, vor allem die Rasterzellen des Klimasignals. Die höchste Klimawirkung stellt sich aufgrund der wärmeren Tallage, des starken Wärmeinseleffektes und der hohen hitzesensitiven Bevölkerung auf Flächen der Bezirke Jena-Zentrum und Jena-Nord ein.

### ***Trockenstress für die Vegetation***

Bei der Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* wurden, wie bei der Betrachtung der statistischen Bezirke, die Teilklimawirkungen für Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume getrennt bearbeitet und zur Gesamtklimawirkung aggregiert. Die Teilklimawirkungen für die drei Teilaspekte des Trockenstress für die Vegetation und die kombinierte Gesamtklimawirkung auf Ebene der Einzelflächen im Stadtgebiet Jena zeigt Abbildung 57a-d (S. 141). Auch hier wird die grobe Auflösung des Klimasignals in den Karten anhand kantiger Strukturen erkennbar. Bei der Teilklimawirkung auf Ackerflächen treten die Bereiche auf der Hochfläche im Nordwesten Jenas aufgrund guter KWB und guter Wasserversorgung der Böden als deutlich unterdurchschnittlich hervor; Flächen mit überdurchschnittlich starker Teilklimawirkung, d. h. potenziellem Trockenstress, finden sich im Norden und Nordosten des Stadtgebietes. Die Teilklimawirkung des Trockenstress für Waldflächen weist Bereiche mit überdurchschnittlich hohen Werten im Norden, Nordosten und Süden des Stadtgebietes auf. Die Teilklimawirkung des Trockenstress für die Stadtbäume liegt aufgrund der eingegangenen Daten sehr detailliert vor und ist in Abbildung 57c (S. 141) dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisflächen sehr viel kleinteiliger sind, als die der Teilklimawirkungen für Acker- und Waldflächen und nur in einer Karte großen Maßstabs sinnvoll verwendet werden können. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt beispielhaft einen Bereich im Damenviertel (Bezirk Jena-Zentrum), der Einzelbäume und Baumreihen erkennen lässt. Die ermittelten Teilklimawirkungen für Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume wurden zur Gesamtklimawirkung des *Trockenstress für die Vegetation* aggregiert, die in Abbildung 57d (S. 141) dargestellt ist. Die grobe Auflösung des Klimasignals lässt sich deutlich erkennen. Flächen mit überdurchschnittlich starker Gesamtklimawirkung finden sich im Norden und Nordosten des Stadtgebietes für Acker- und Waldflächen, im Süden und Südosten auf Ackerflächen sowie nördlich des Stadtzentrums für Stadtbäume. Eine vergleichsweise geringe Gesamtklimawirkung tritt im Nordwesten des Stadtgebietes auf Ackerflächen sowie im Westen und Südosten auf Waldflächen auf.



**Abbildung 56: Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung der Wärmebelastung für die Bevölkerung auf Ebene der Einzelflächen im Stadtgebiet Jena für die Klimaperiode 1981-2010. Klassifizierung nach Standardabweichung (eigene Darstellung)**



**Abbildung 57: Teilklimawirkungen für die drei Teilaspekte des Trockenstresses für die Vegetation und kombinierte Gesamtklimawirkung auf Ebene der Einzelflächen im Stadtgebiet Jena für die Klimaperiode 1981-2010. Klassifizierung nach Standardabweichung (eigene Darstellung)**

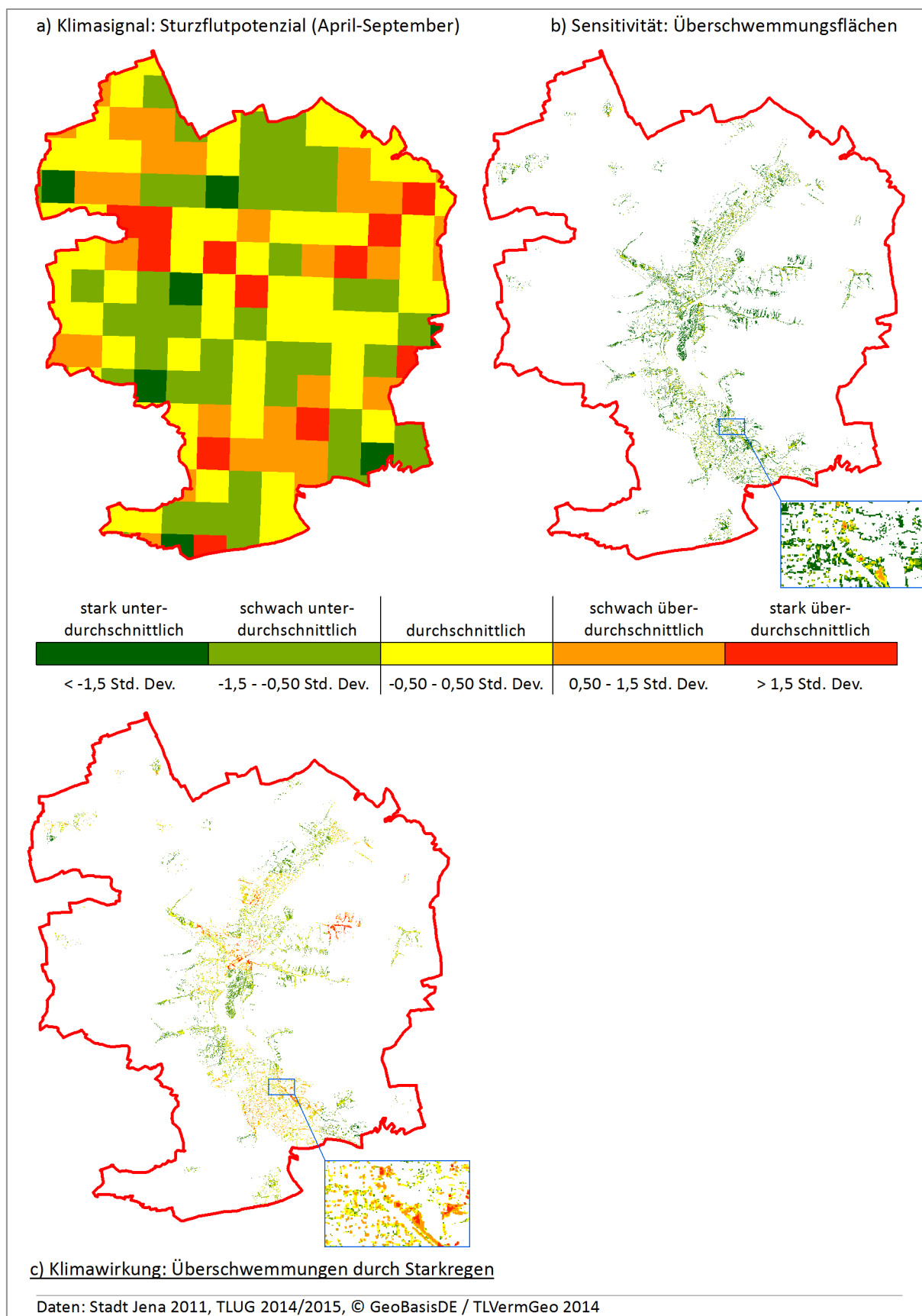
### ***Überschwemmungen durch Starkregen***

Klimasignal, Sensitivität und Klimawirkung für *Überschwemmungen durch Starkregen* sind in Abbildung 58a-c (S. 143) wiedergegeben. Das Klimasignal ist mit 1.000 m grob aufgelöst. Die Verteilung ist sehr heterogen und lässt keine unterliegenden Muster erkennen. Zellhäufungen mit überdurchschnittlich hohen Werten zeigen sich im Süden, Westen und Nordosten des Stadtgebietes. Der Indikator der Sensitivität ist räumlich sehr fein aufgelöst und lässt unterdurchschnittliche Werte im Großteil der Ortslagen erkennen. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt beispielhaft einen Bereich im statistischen Bezirk Lobeda-Altstadt mit Flächen überdurchschnittlicher Sensitivität. Abbildung 58c (S. 143) stellt die Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* dar. Die höchsten Werte finden sich im Stadtzentrum (Jena-Zentrum, Wenigenjena/Kernberge) und nordöstlich davon (Wenigenjena/Schlegelsberg), aber auch im Süden des Stadtgebietes (Lobeda-West, Lobeda-Altstadt). Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung der Überschwemmungsmodellierung bedarf es einer weiteren Verarbeitung der Flächendaten oder einer Karte großen Maßstabs, um das Ergebnis sinnvoll nutzen zu können.

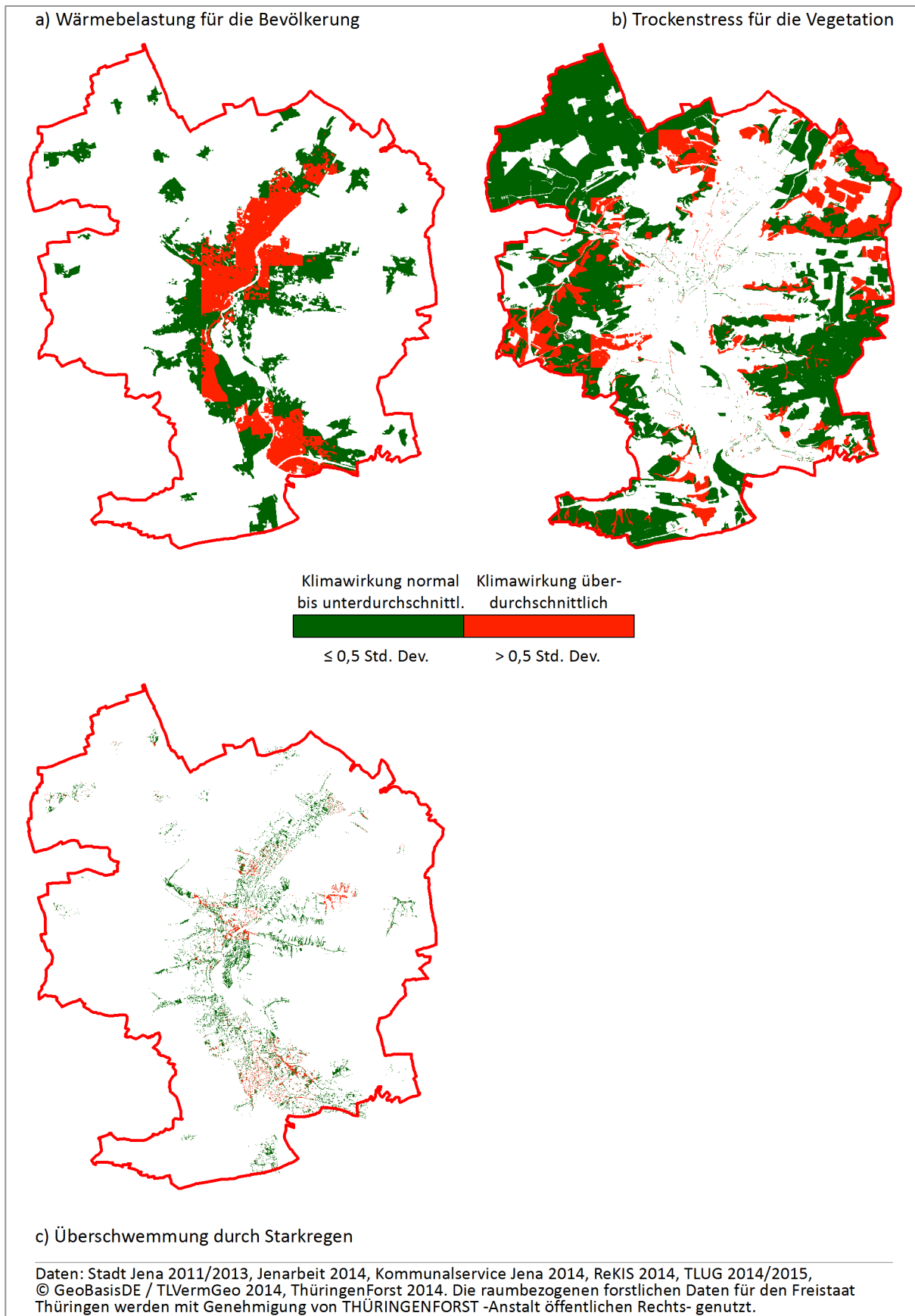
### ***Priorisierung und kartografische Aufbereitung***

Die Priorisierung dient der bewussten Einschränkung auf Flächen für die heute und künftig ein hoher Handlungsbedarf besteht. Dabei werden Flächen für die Planungshinweiskarte übernommen für die in der Klimaperiode 1981-2010 eine überdurchschnittliche Klimawirkung ermittelt wurde. Abbildung 59a-c (S. 144) zeigt die priorisierten, rot gefärbten Flächen für die einzelnen Klimawirkungen. Die Priorisierung führte zu einer Reduzierung des ursprünglichen Flächenumfangs auf ca. 40 % bzw. 970 ha für die Wärmebelastung, ca. 23 % bzw. 1.260 ha für den Trockenstress und ca. 19 % bzw. 85 ha für die lokalen Überschwemmungen.

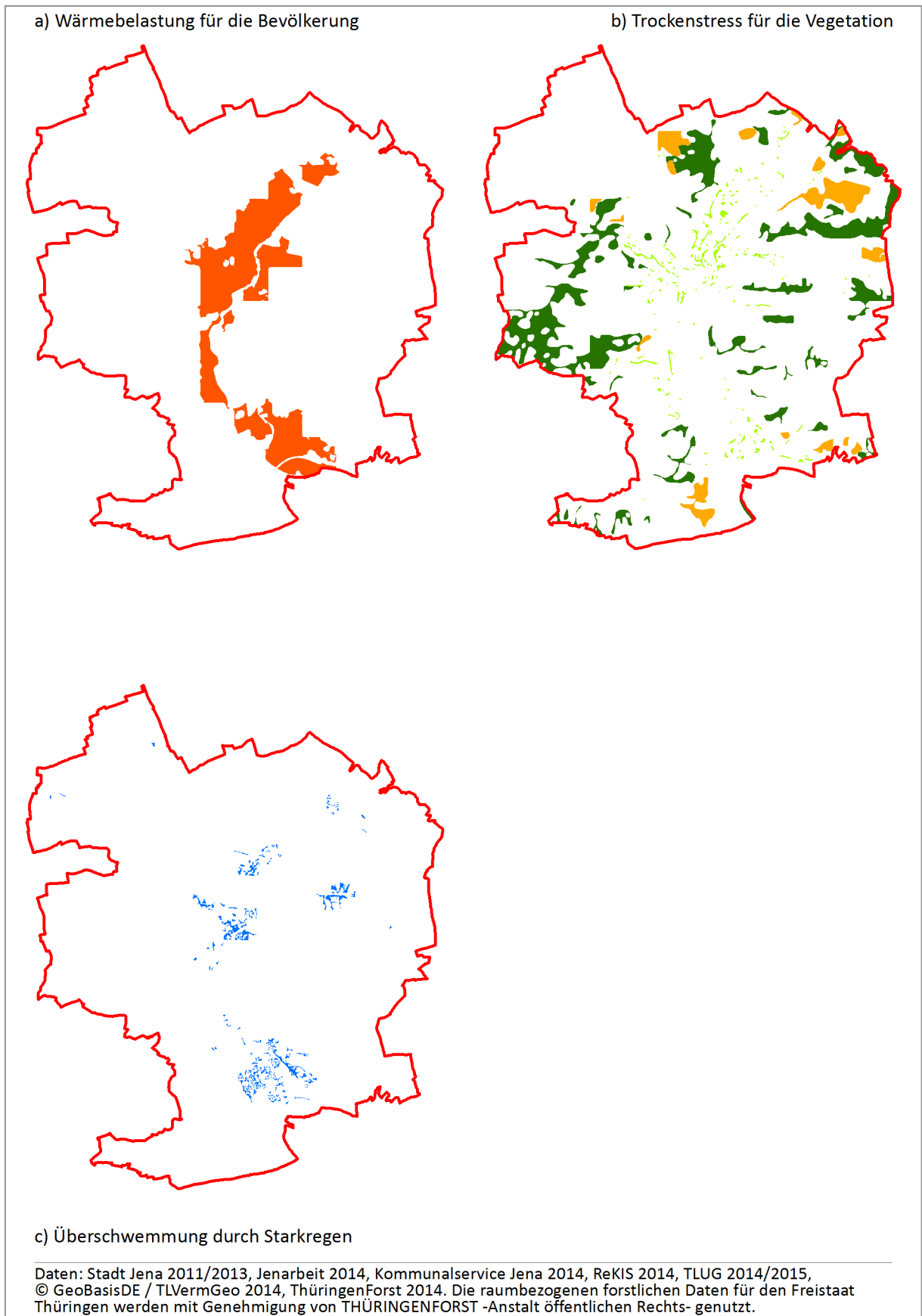
Für eine ansprechendere Kartendarstellung wurden die priorisierten Flächen der Klimawirkungen einer differenzierten Generalisierung unterzogen. Bei sehr kleinen Flächen, wie z. B. bei der Klimawirkung *Trockenstress für Stadtbäume*, wurden diese zur besseren optischen Wahrnehmung vergrößert. Das Ergebnis des Prozesses ist in Abbildung 60a-c (S. 145) zu sehen. Aufgrund der Ausgangsdaten erscheint die Flächenkulisse der *Wärmebelastung für die Bevölkerung* weiterhin recht grob aufgelöst im Vergleich zu den kleinteiligeren Flächenkulisssen der Klimawirkungen *Trockenstress für Stadtbäume* und *Überschwemmungen durch Starkregen*.



**Abbildung 58: Klimasignal, Sensitivitäten und Klimawirkung für Überschwemmungen durch Starkregen auf Ebene der Einzelflächen im Stadtgebiet Jena für die Klimaperiode 1981-2010. Klassifizierung nach Standardabweichung (eigene Darstellung)**



**Abbildung 59: Priorisierung von Flächen mit überdurchschnittlicher Klimawirkung im Stadtgebiet Jena für die Klimaperiode 1981-2010. Klassifizierung nach Standardabweichung (eigene Darstellung)**



**Abbildung 60: Kartografische Aufbereitung der priorisierten Flächenkulissen der Klimawirkungen im Stadtgebiet Jena für die Klimaperiode 1981-2010. Teilabbildung b: Ackerflächen (Ocker), Waldflächen (Dunkelgrün), Stadtbäume (Hellgrün) (eigene Darstellung)**

### 5.6.2 Handlungsempfehlungen

Für die untersuchten (Teil-)Klimawirkungen und zusätzlichen relevanten Informationsebenen wurden neun Zielstellungen definiert und in Tabelle 13 dargestellt. Die Zielstellungen umschreiben, was durch die Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen erreicht werden soll und stellen somit den Handlungsauftrag zur Klimaanpassung für die städtischen Akteure dar.

**Tabelle 13: Zielstellungen und Handlungsempfehlungen für die Klimawirkungen im Stadtgebiet Jena (verändert nach KURMUTZ et al. 2012)**

Klima-wirkung	Räumlicher Kontext	Zielstellungen	Empfehlungs-gruppe	Beispielhafte Handlungsempfehlungen
Wärmebelastung für die Bevölkerung	Verdichteter städtischer Bereich	Wärmebelastung senken und Aufenthaltsqualität erhöhen	W1	HUM-17, HUM-05, HUM-01, HUM-02, HUM-03, HUM-04, HUM-16, HUM-20, HUM-23, HUM-26, MAN-10
	Einrichtungen in denen sich besonders hitzesensitive Personengruppen aufhalten	Wärmebelastung senken, Informationslage verbessern und Gesundheitsvorsorge stärken	W2	HUM-13, HUM-07, HUM-08, HUM-09, HUM-10, HUM-15, HUM-24, HUM-22, HUM-16, HUM-03, HUM-05
	Stadtlagen im Bereich wichtiger Kaltluftleitbahnen	Kalt- bzw. Frischluftzufuhr erhalten, um Abkühlung in überwärmten Gebieten zu verbessern	W3	HUM-21, HUM-01, HUM-23, HUM-28, MAN-12, HUM-06
Trockenstress für die Vegetation	Ackerflächen	Artenwahl prüfen und anpassen, ggf. Wasserversorgung optimieren	T1	LAN-07, LAN-12, MAN-21, LAN-05, LAN-02, LAN-11, LAN-08
	Wald- und Forstflächen	Artenwahl prüfen und anpassen sowie Waldbrand-Monitoring intensivieren	T2	FOR-04, FOR-01, FOR-05, MAN-21, FOR-03
	Stadtbäume	Artenwahl prüfen und anpassen sowie Wasserversorgung optimieren	T3	MAN-19, MAN-20, MAN-21, MAN-16, HUM-26, MAN-15
Überschwemmungen durch Starkregen	Besonders überschwemmungsgefährdete Bereiche	Kanalsystem optimieren und Versickerung von Regenwasser verbessern	U1	HWA-03, HWA-16, MAN-08, MAN-09, MAN-32, HWA-10
	Bekannte Einsatzorte nach Starkniederschlagsereignissen	Einsatzort monitoren und ggf. künftig priorisieren; evtl. Kanalsystem optimieren	U2	MAN-01, MAN-05, MAN-07, MAN-08, MAN-31, HWA-08
	Infrastrukturen und Siedlungsbereiche in Nähe zu besonders erosionsgefährdeten Abflussbahnen auf Ackerland	Einsatzbereitschaft erhöhen, ggf. erosive Fließbahnen in Grünland umwandeln	U3	FOR-06, LAN-01, LAN-03, LAN-04, ENE-01, HWA-03, HWA-12, HWA-11, MAN-30

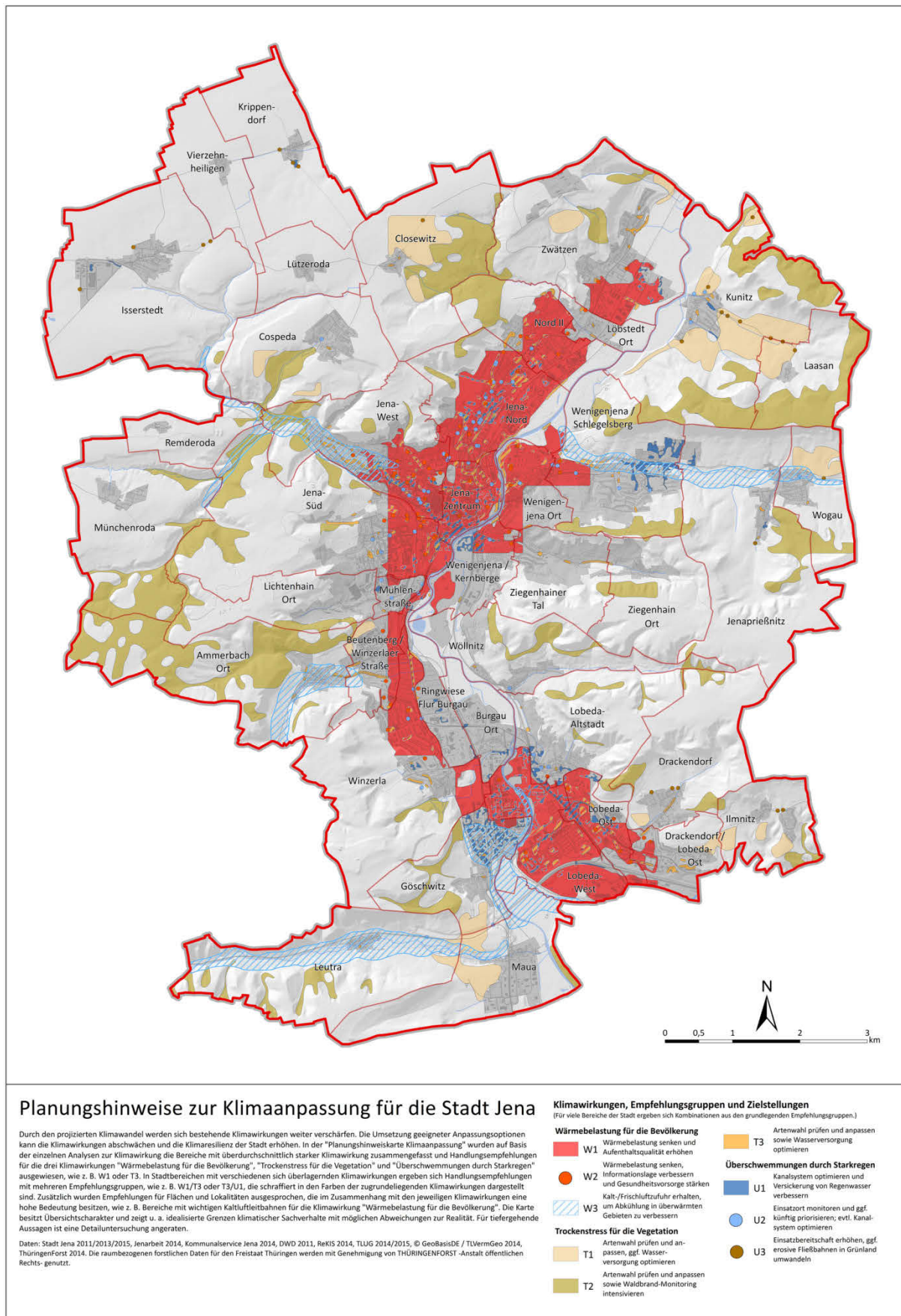


Für die Zielstellungen wurden Empfehlungsgruppen gebildet, die jeweils eine Reihe von Handlungsempfehlungen enthalten, die bei Umsetzung nachhaltige Anpassungseffekte für die verschiedenen Klimawirkungen erzielen. Tabelle 15 (Anhang) listet alle in Tabelle 13 (S. 146) vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen mit Beschreibung auf.

### 5.6.3 Planungshinweiskarte

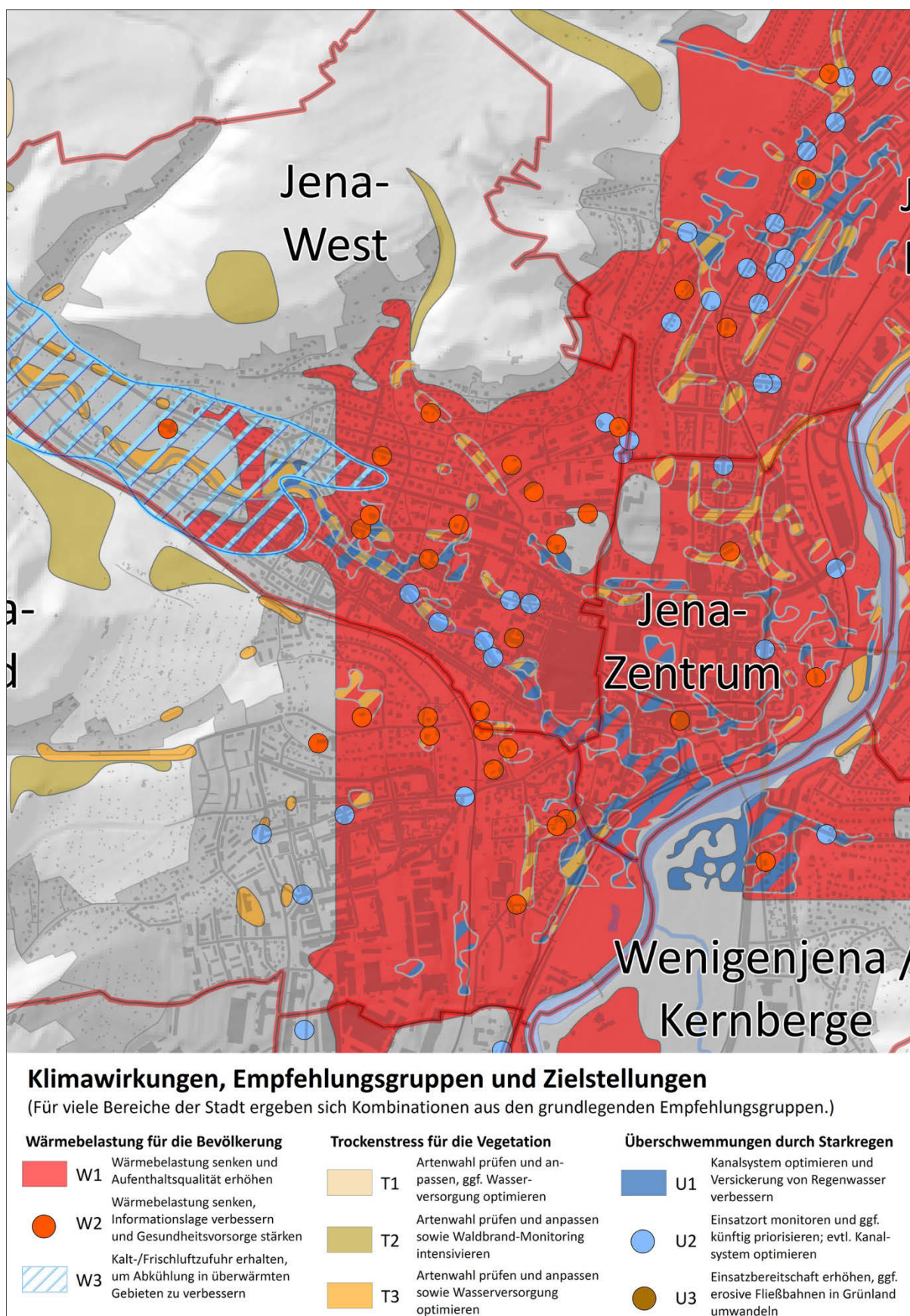
Für die *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* wurden die Flächenkulissen der Klimawirkungen mit den Zielstellungen und Handlungsempfehlungen räumlich verknüpft und kartografisch aufbereitet. Neben den Klimawirkungen selbst wurden weitere relevante Informationsebenen in die Karte aufgenommen sowie Topografie und Bezirksgrenzen zur Orientierung eingefügt. Abbildung 61 (S. 148) zeigt eine verkleinerte Gesamtansicht der Planungshinweiskarte und Abbildung 62 (S. 149) eine vergrößerte Detailansicht des westlichen Stadtzentrums. Die Karte hat Übersichtscharakter und orientiert sich mit einem Maßstab von 1:15.000 am Flächennutzungsplan der Stadt Jena. Die Karte liegt der Arbeit in Originalgröße auf CD bei.

Insgesamt werden für ca. 25% des Stadtgebietes von Jena Handlungsempfehlungen ausgesprochen. Davon nimmt die Empfehlungsgruppe T2 mit etwa 1.150 ha den größten Flächenanteil ein, gefolgt von W1 (ca. 1.100 ha) und T1 (ca. 350 ha). Empfehlungen zur *Wärmebelastung für die Bevölkerung* (W1, W2) betreffen vor allem die verdichteten Stadtbereiche in der Tallage, z. B. die Bezirke Jena-Zentrum, Jena-Nord, Jena-West und Lobeda-West. Kaltluftleitbahnen sollten insbesondere in den Bezirken Jena-West, Beutenberg/Winzerlaer Straße und Göschwitz freigehalten und verbessert werden (W3). Anpassungsmaßnahmen zum *Trockenstress für die Vegetation* empfehlen sich für Waldflächen (T2) vor allem im Norden, Nordosten und Westen (Laasan, Kunitz, Closewitz, Ammerbach-Ort) und für Ackerflächen (T1) ebenso im Norden und Nordosten (Closewitz, Kunitz, Laasan). Die Handlungsempfehlungen für Stadtbäume (T3) sollten im gesamten Stadtgebiet realisiert werden. Handlungsoptionen für *Überschwemmungen durch Starkregen* (U1, U2) sollten im Zentrum (Jena-Zentrum, Jena-Nord, Jena-West, Wenigenjena/Schlegelsberg) und im Süden (Göschwitz, Lobeda-West, Lobeda-Altstadt) Jenas umgesetzt werden. Anpassungsmaßnahmen gegen erosive Sturzfluten (U3) werden vor allem in den ländlichen Bereichen des nordwestlichen und nordöstlichen Stadtgebietes empfohlen (Isserstedt, Krippendorf, Kunitz, Laasan). In Abbildung 62 (S. 149) sind Flächen mit sich überlagernden Klimawirkungen gut zu erkennen. Diesen Flächen sollte besondere Aufmerksamkeit gelten und dort bevorzugt multifunktionale Anpassungsmaßnahmen mit Synergieeffekten zur Umsetzung kommen.



**Abbildung 61: Planungshinweiskarte Klimaanpassung für die Stadt Jena: verkleinerte Gesamtansicht. Karte in originaler Auflösung auf beiliegender CD (eigene Darstellung)**





**Abbildung 62: Planungshinweiskarte Klimaanpassung für die Stadt Jena: vergrößerte Detailansicht. Karte in originaler Auflösung auf beiliegender CD (eigene Darstellung)**

## 6. Diskussion

### 6.1 Datenbasis

Für die Analyse der Klimawirkungen auf die Stadt Jena wurden für Kommunen frei zugängliche und kostenfreie Daten verwendet. Für die Klimasignale der Gegenwart (1981-2010) kamen Daten des Regionalen Klimainformationssystems (*ReKIS*) und der Thüringer Klimaagentur mit 1.000 m räumlicher Auflösung zum Einsatz. Die *ReKIS*-Daten wurden durch flächenhafte Interpolation von Messdaten des Stationsnetzes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) generiert. Diese Daten sind belastbar und für die Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen verfügbar. Für Jena existieren bisher drei Arbeiten, die sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadt beschäftigen (GUDE et al. 2009, KURMUTZ et al. 2012, HOFFMANN et al. 2014). Die darin verwendeten Klimadaten sind räumlich höher aufgelöst, als die in der Arbeit genutzten, sie entstammen jedoch Modellrechnungen, die Kommunen nicht oder nicht kostenfrei zur Verfügung stehen und zeitaufwendig generiert werden müssten. Dies gilt auch für Klimadaten bei gesamtstädtischen Analysen in anderen urbanen Räumen, die vornehmlich auf die Wärmebelastung fokussieren (z. B. BEHRENS & GRÄTZ 2009, BRANDL et al. 2011, FRÜH et al. 2011, AUBRECHT & ÖZCEYLAN 2013). Somit stellt die Nutzung frei verfügbarer Klimadaten einen Vorteil dar. Überschwemmungen durch Starkregen werden in keiner der bisherigen Arbeiten für Jena mittels flächenhafter Klimadaten untersucht. Hier liefert die Arbeit neue Erkenntnisse für die Stadt.

Den für Jena und andere Städten genannten Arbeiten ist hinsichtlich der Klimadaten gemein, dass für die Zukunftsbetrachtung nur Projektionen aus wenigen Regionalklimamodellen und die älteren *SRE*-Szenarien genutzt wurden. In der Arbeit werden für das Klimasignal der zukünftigen Zeitebene keine räumlich aufgelösten Daten genutzt, da diese bisher für die aktuellen *RCP*-Szenarien nicht regionalisiert verfügbar sind. Stattdessen werden räumlich gröbere Klimasignale aus einem Ensemble von Globalmodellen, die alle vier *RCP*-Szenarien berücksichtigen, für Trendanalysen der Region Jena genutzt. Diese Herangehensweise ist neu für kommunale Klimawirkungsanalysen und hat den Vorteil, dass sowohl gegenwärtige als auch künftige Klimasignale auf vergleichsweise belastbaren Daten beruhen: flächeninterpolierte Messdaten für die Gegenwart, ensemblebasierte Trends für die Zukunft. Dies bietet der Zielgruppe der kommunalen Akteure erhöhte Sicherheit bei auf Langfristigkeit angelegten, planerischen Entscheidungen zur städtischen Entwicklung.

Als Daten für die Sensitivität der Gegenwart wurden Kommunal- und Landesdaten genutzt. Die Daten zeigen eine große Bandbreite bezüglich ihrer räumlichen Auflösung und reichen von punktgenauen Geodaten des Baumkatasters bis zu demographischen und sozio-ökonomischen Sachdaten auf der Ebene statistischer Bezirke Jenas. Die Sensitivität gegenüber Klimawirkungen wurde in den für Jena genannten Arbeiten bisher ungenügend berücksichtigt (GUDE et al. 2009, KURMUTZ et al. 2012, HOFFMANN et al. 2014). Auch andere Studien weisen diesbezüglich Schwachpunkte auf (z. B. TMLFUN 2013, STEINRÜCKE et al. 2016). Für die künftige Entwicklung der Sensitivitäten wurden Trendanalysen durchgeführt. In Anbetracht der direkten Abhängigkeit der Klimawirkung von der Sensitivität gegenüber dem Klimasignal ist die Berücksichtigung der Sensitivität zwingend erforderlich (vgl. Kapitel 4.2). Die umfassende und systematische Integration der Sensitivität in eine kommunale Klimawirkungsanalyse stellt daher eine Verbesserung der Methodik im Allgemeinen sowie der Ergebnisse für Jena dar.

Für die stationsbezogene Analyse der Klimaänderungen standen Messdaten sowie Projektionen zweier regionaler Klimamodelle für die DWD-Station Jena-Sternwarte zur Verfügung. Bisherige Auswertungen umfassten längstens den Zeitraum 1901-2050 (KURMUTZ et al. 2012). Die Arbeit erweitert den Betrachtungshorizont um gut 130 Jahre auf den Zeitraum 1824-2100 und analysiert die Entwicklung der für Klimafolgenanalysen wichtigsten Kenngrößen.

In Bezug auf die gestellte These

(1a) Frei zugängliche Klima- und Fachdaten eignen sich für kommunale Klimawirkungsanalysen.

kann festgestellt werden: Die verwendeten, frei zugänglichen Klima- und Fachdaten eignen sich grundsätzlich für gegenwartsbezogene Klimawirkungsanalysen auf räumlicher Ebene von Stadtteilen, statistischen Bezirken oder vergleichbaren städtischen Teilräumen, nicht nur für Jena, sondern auch für andere Städte. Für Klimadaten sollte jedoch ein angemessenes Verhältnis zwischen räumlicher Auflösung der Daten und der durchschnittlichen Größe der Teilräume berücksichtigt werden, so dass das Klimasignal für einen Teilraum aus möglichst vielen Rasterzellen ermittelt wird. Dies war für Jena für kleinere statistische Bezirke nicht immer gegeben. In allen Städten finden sich Datensätze mit demographischen und sozio-ökonomischen Merkmalen, die den in der Arbeit genutzten Daten vergleichbar sind. Klimada-

ten und Datensätze zur Landnutzung, Versiegelung oder zum Waldbestand etc. stehen in ähnlicher Qualität in der Regel bei den entsprechenden Landesämtern für die Kommunen kostenfrei zur Verfügung. Für weitergehende Detailanalysen, z. B. auf Ebene von Quartieren oder Einzelflächen, sind Klimadaten mit einer Auflösung von 1000 m, unabhängig von der untersuchten Stadt, nur eingeschränkt geeignet. Fachdaten zur Sensitivität sind im Allgemeinen räumlich höher aufgelöst vorhanden und auch für Detailanalysen einsetzbar. Demographische und sozio-ökonomische Daten sind jedoch teilweise – wie in Jena – aufgrund des Datenschutzes nicht vollständig, so dass Datenlücken erst geschlossen werden müssen. Für die Analyse der Klimawirkungen künftiger Klimaperioden, wie z. B. 2071-2100, sind heute, unabhängig vom Untersuchungsgebiet, weder Klima- noch Sensitivitätsdaten räumlich hoch genug aufgelöst und belastbar vorhanden, um Aussagen auf Ebene von Stadtteilen, statistischen Bezirken oder vergleichbaren städtischen Teilräumen treffen zu können. Hier erbringt die qualitative Analyse der Trends von Klimaensembles und Sensitivitätsdaten belastbarere Ergebnisse als die Verknüpfung einzelner Regionalklimamodelle mit Sensitivitätsdaten der Gegenwart. Die Auswertung von Klima- und Sensitivitätsszenarien ist auch in Hinsicht auf die zeitlichen und fachlichen Limitierungen der Zielgruppe der städtischen Akteure geeignet.

## 6.2 Methoden

Der in dieser Arbeit verwendete methodische Ansatz orientiert sich an der Vulnerabilitätsbewertung des IPCC (2007) und dessen Weiterentwicklung durch BUTH et al. (2015) und GREIVING et al. (2015). Der verbesserte Ansatz enthält jedoch Widersprüche hinsichtlich der Zeitbezüge der verwendeten Daten und wurde in dieser Arbeit konzeptionell erweitert (vgl. Kapitel 4.2). Durch die Ergänzung um eine Zeitebene der Vergangenheit wird der Analyserahmen methodisch konsistent. Eine konsequente Trennung der Zeitebenen bringt zugleich Probleme in Bezug auf die Datenverfügbarkeit mit sich. Damit reduziert sich die Aussage-schärfe für die Zeitebenen jenseits der Gegenwart. Eine zeitebenenübergreifende Bewertung in Bezug auf die Veränderung der Klimawirkung infolge des Klimawandels ist wünschenswert, jedoch praktisch aufgrund Datenmangels nicht durchführbar. Daher wurden in der Arbeit die Klimawirkungen für die Gegenwart nach dem modifizierten Ansatz bestimmt und für die zukünftigen Klimawirkungen Trends der Klimasignale und Sensitivitäten anhand verfügbarer Szenarien analysiert (vgl. Kapitel 6.1), die eine qualitative Einschätzung der künftigen Entwicklung ermöglichen. Ein vergleichbares Konzept zur Bewertung der künftigen Klimawirkung wird für urbane Räume nur durch KURMUTZ et al. (2016) für die Stadt Zwickau vor-

gelegt. Dieses fußt für das Klimasignal jedoch nur auf einem einzelnen Regionalklimamodell anstatt des in dieser Arbeit verwendeten, belastbareren Ensembles von Klimamodellen.

Eine zweite vorgenommene Erweiterung des Ansatzes von BUTH et al. (2015) und GREIVING et al. (2015) besteht in der Zusammenführung der einzelnen Klimawirkungen zu einer Gesamtklimawirkung (vgl. Kapitel 4.2). Eine Gesamtbewertung erfolgt bei BUTH et al. (2015) nur qualitativ beschreibend für einzelne Handlungsfelder, während im vorliegenden Ansatz die Klimawirkungen quantitativ zur Gesamtklimawirkung aggregiert werden, wie es bei SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING (2013) und KURMUTZ et al. (2016) der Fall ist. Ziel ist ein Indikator zur Bewertung der Gesamtklimawirkung. Dieser Indikator kann modular erweitert werden, sollten später Analysen zu weiteren Klimawirkungen vorliegen. Für die Gesamtklimawirkung werden sowohl die im statistischen Bezirk vorkommenden als auch die nicht vorkommenden Klimawirkungen im Sinne eines Vorteils berücksichtigt. Hierzu wird die Kombination von absolutem, d. h. alle Klimawirkungen im Stadtgebiet, und relativem Bezug, d. h. alle Klimawirkungen im statistischen Bezirk, untersucht. Dieses Vorgehen ermöglicht eine realistischere Bewertung der unterschiedlich starken Auswirkungen des Klimas in den Teilräumen eines Untersuchungsgebietes.

Die Umsetzung der Methodik erfolgte für die Gegenwart (1981-2010) vor allem durch Indikatorenansätze mit Hilfe eines gebräuchlichen Geoinformationssystems (GIS). Zwar können Wirkmodelle die komplexen und häufig nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Klimasignal und Sensitivität abbilden und liefern bereits aggregierte Ergebnisdaten, sie sind jedoch daten- und wissensaufwändig und nicht für alle Klimawirkungen vorhanden (BUTH et al. 2015). Hingegen ist nach HINKEL (2011) die Nutzung von Vulnerabilitätsindikatoren besonders auf der lokalen Ebene zur Identifikation von durch den Klimawandel betroffenen Personengruppen und Handlungsfeldern geeignet. Auch werden Vulnerabilitätsindikatoren als das Mittel der Wahl für die Informationsvermittlung zwischen Wissenschaft und Politik gesehen. Indikatorenansätze sind zudem flexibel an die gewünschte Fragestellung und Datenlage anpassbar sowie einfacher zu handhaben als Wirkmodelle. Nachteil von Indikatorenansätzen ist der schlechter abgebildete Wirkzusammenhang und die teils reduzierte räumliche Genauigkeit gegenüber Wirkmodellen. Insgesamt sind Indikatorenansätze jedoch für die Rahmenbedingungen der Zielgruppe der städtischen Akteure besser geeignet, da eine schnelle und kostenreduzierte Analyse von Belastungsgebieten möglich ist. Eine weitere Analyse dieser Gebiete unter Zuhilfenahme von Wirkmodellen kann dann konzentriert bei Bedarf erfolgen.

Für die Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung* wurde ein Indikatorenansatz ähnlich BUTH et al. (2015) verwendet, dieser jedoch um zusätzliche Sensitivitätsdaten erweitert, wie sie in Ansätzen zur sozialen Vulnerabilität gebräuchlich sind (z. B. CUTTER et al. 2003, REID et al. 2009, JOHNSON et al. 2012). Dieses Vorgehen schließt, neben älteren Menschen, auch andere hitzesensitive Personengruppen in die Bewertung ein. Bei der Verarbeitung der Variablen der Sensitivität wurden generell absolute statt relativer Werte genutzt, da sie für die Fragestellung und Zielgruppe aussagekräftiger sind. Die Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* setzt sich aus den Teilklimawirkungen für Acker- und Waldflächen sowie Stadtbäume zusammen. Als Klimasignal diente die klimatische Wasserbilanz (KWB) in der ackerbaulichen bzw. forstlichen Vegetationsperiode, die jedoch anstatt für die Hauptvegetationsperiode (z. B. AG BODEN 2005, BUTH et al. 2015) für die thermische Vegetationsperiode ermittelt wurden, um potenziellen Wassermangel zu Vegetationsbeginn im Frühjahr zu berücksichtigen. Für die Länge der thermischen Vegetationsperiode wurden nicht vordefinierte Monats-Zeiträume genutzt (z. B. AG BODEN 2005, BUTH et al. 2015), sondern tagesgenaue Zeiträume über die Nutzung von Temperaturschwellwerten direkt für Jena ermittelt. Dies ermöglicht eine bessere Bestimmung der KWB und damit des möglichen Trockenstresses. Für Wald- und Stadtbäume wurde die Sensitivität über die Klimaarten-Matrizen (*KLAM-Wald*, *KLAM-Stadt*) nach ROLOFF & GRUNDMANN (2008) und ROLOFF et al. (2008) bestimmt. Sie stellen einen guten Kompromiss zwischen wissenschaftlichem Anspruch, praktischer Anwendbarkeit und Bewertungscharakter dar und bieten eine umfangreichere Bewertungsbasis als das Konzept der Klimahüllen (KÖLLING 2007) oder der Ansatz von SPELLMANN et al. (2011). Für die Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* wurden die Sensitivitätsdaten in Form von Überflutungsflächen und -höhen über ein Wirkmodell gewonnen. Hier genügen Indikatorenansätze (z. B. FERNÁNDEZ & LUTZ 2010, ARMENAKIS & NIRUPAMA 2014, BUTH et al. 2015) nicht mehr, da sie den Stoff- und Energieaustausch zwischen Nachbarzellen nicht berücksichtigen. Für eine Überflutungsmodellierung größerer Stadtgebiete unter Verwendung von gebräuchlichen PCs ist das Wirkmodell *r.sim.water* nur eingeschränkt geeignet. Zudem wird im Modell kein Kanalnetz berücksichtigt und der Arbeitsaufwand für die Zielgruppe ist durch die Nutzung eines Wirkmodells höher. Trotzdem ist die Qualität der Sensitivitätsdaten höher als bei Ergebnissen von Indikatorenansätzen. Die Verknüpfung zur Klimawirkung erfolgte wieder mittels Indikatorenansatz mit dem Klimasignal Sturzflutpotenzial. Dieses ist mit dem kurzen Betrachtungszeitraum von 2004-2010 kein „echtes Klimasignal“, bezieht sich jedoch explizit auf sommerliche konvektive Starkniederschläge, was aussagekräf-



tiger ist als z. B. die ganzjährige Anzahl der Tage mit einer Niederschlagssumme ab 20 mm (BUTH et al. 2015).

Die Ergebnisse in Form von Klimasignalen, Sensitivitäten und Klimawirkungen werden als Indikatoren mit einem Wertebereich von [1,2] präsentiert. Es wurde bewusst nicht der übliche Wertebereich [0,1] verwendet (z. B. VINCENT 2004, OECD 2008), um Fehlinterpretationen des Wertes Null zu vermeiden. Eine Null bedeutet hier nicht *keine Klimawirkung*, sondern die vergleichsweise *geringste Klimawirkung*. Aufgrund allgemein fehlender Grenz- und Vergleichswerte für Klimawirkungen in Forschung und Praxis kann nur eine relative Bewertung der statistischen Bezirke innerhalb des Untersuchungsgebietes erfolgen, was jedoch allgemeine Praxis ist (z. B. CUTTER et al. 2003, CHOW et al. 2012, BUTH et al. 2015).

Die eingangs aufgestellte These

- (1b) Geoinformationssysteme in Verbindung mit indikatorbasierten Ansätzen sind geeignet, die lokalen Auswirkungen des Klimawandels räumlich differenziert aufzuzeigen.

kann bestätigt werden. Wirkmodelle bieten im Allgemeinen eine bessere Ergebnisqualität, sind jedoch daten- und wissensintensiver in der Anwendung als Indikatorenansätze, die mit vorhandenen Daten genutzt werden können und an die gewünschte Fragestellung anpassbar sind. Für die Zielgruppe der städtischen Akteure sind Indikatorenansätze demnach die bessere Wahl. Die bereits in GIS enthaltenen Werkzeuge eignen sich zur Anwendung von Indikatorenansätzen zur Analyse der lokalen Auswirkungen des Klimawandels. Alle beschriebenen Arbeitsschritte wurden mittels eines GIS und einer Tabellenkalkulationssoftware umgesetzt. Beide Programme sind heute in größeren Stadtverwaltungen Standardsoftware. Für die in der Arbeit verwendeten Methoden kann gesagt werden, dass sie auch außerhalb des Untersuchungsgebietes Jena angewendet werden können. Die Methoden sind hier dokumentiert und basieren auf der Anwendung von gebräuchlicher Software. Sie können von der Zielgruppe mit vertretbarem Aufwand auf andere urbane Räume übertragen werden. Einzig das im GIS enthaltene Wirkmodell zur Überschwemmungsmodellierung ist anspruchsvoller in der Nutzung, liefert jedoch entsprechend bessere Ergebnisse, die einen Mehraufwand rechtfertigen.

### 6.3 Klimawirkungen

#### *Wärmebelastung für die Bevölkerung*

Für die Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung* wurde die Anzahl Heißer Tage als Klimasignal verwendet. Hier zeichnet sich trotz grober räumlicher Auflösung, mit bis zu 13 Tagen, eine Konzentration im Saaletal ab, während die umgebenden Höhen aufgrund stärkerer Durchlüftung, mit etwa sechs Tagen, teilweise nur die Hälfte der Anzahl Heißer Tage der Tallage erreichen. In der Untersuchung von HOFFMANN et al. (2014) wurde eine Wertespanne zwischen 14-16 Heißen Tagen im Stadtzentrum und 0-2 Heiße Tage auf den Hochflächen für die Klimaperiode 1971-2000 ermittelt. Das von HOFFMANN et al. (2014) verwendete Wirkmodell *MUKLIMO\_3* berücksichtigt mit der Bebauung den städtischen Wärmeinseleffekt schon als einen Teil der Sensitivität und sollte damit tendenziell höhere Werte aufweisen. Auffallend ist jedoch der starke Unterschied von mehreren Heißen Tagen für die umgebenden Hochflächen, der nicht durch den um zehn Jahre differierenden Bezugszeitraum und eine zwischenzeitliche Klimaerwärmung erklärt werden kann. Gründe für die Abweichung können eine schlechte Flcheninterpolation der DWD-Messdaten in *ReKIS* sein oder eine mangelhafte Handhabung von nicht-urbanen Landnutzungen durch *MUKLIMO\_3*. Vorerst wird das verwendete Klimasignal als belastbar und – auch aufgrund der freien Verfügbarkeit – als geeignet eingeschätzt.

Beim Wärmeinseleffekt als Teil der Sensitivität zeigen sich die höchsten Werte erwartungsgemäß entlang der Talachse der Saale mit dem Hauptsiedlungskrper, während die geringsten Werte auf den umgebenden Hochflächen mit ländlichem Charakter auftreten. Im Vergleich mit dem normalen Versiegelungsgrad, der in Jena (GUDE et al. 2009) und auch allgemein oft zur Beschreibung des städtischen berwrmungspotenzials benutzt wird (z. B. REID et al. 2009, AUBRECHT & ÖZCEYLAN 2013, KLEIN ROSENTHAL et al. 2014), weist der hier vorgeschlagene Wrmeinselindex eine stärkere Konzentration berwrmungsgefhrdeter Flächen in den zentralen Bereichen der bebauten Gebiete auf. Dies basiert auf der Annahme stärkerer Überwärmung von Flächen ohne Grenzen zu naturnahen Nutzungen wie Parks oder Wald sowie Flächen mit geringer Fragmentierung, die weniger Luftaustausch erfahren. Somit ermöglicht der verwendete Wrmeinselindex, allgemein und für Jena, eine bessere Erfassung der Wärmeinselintensität. Interessant wäre hier eine Quantifizierung der Unterschiede zwischen normalem Versiegelungsgrad und Wrmeinselindex im Vergleich zu einer Temperaturkarte der städtischen Wärmeinsel. Eine Ergänzung des Wrmeinselindex mittels Gebudevo-

lumen, wie sie NG ET AL. (2009) vorschlagen, ist generell sinnvoll, konnte aber aufgrund teils fehlerhafter Höhenangaben im verwendeten 3D-Gebäudemodell nicht umgesetzt werden.

Die Teilsensitivität der hitzesensitiven Bevölkerung zeigt die höchsten Werte in statistischen Bezirken mit Großwohnsiedlungen, die eine hohe Konzentration an Einwohnern sowie sozial vulnerablen Gruppen aufweisen. Die geringste hitzesensitive Bevölkerung findet sich in ländlich geprägten Bezirken auf den umgebenden Höhen. Die Erweiterung des Fokus der hitzesensitiven Bevölkerung über die meist gebräuchliche Personengruppe der Über-65-Jährigen hinaus (z. B. SCHMIDT et al. 2011, STEINRÜCKE et al. 2013, BUTH et al. 2015) ist notwendig für die praktische Anwendung und zeichnet ein realistischeres Bild der unterschiedlichen Hitzesensitivitäten in der Stadt. Für Jena erfolgte eine Berücksichtigung sozial vulnerabler Gruppen bisher nur rudimentär in Form von sozialen Einrichtungen mit entsprechenden Gruppen (KURMUTZ et al. 2012). Auch im Vergleich zu anderen kommunalen Anpassungsstudien wird die umfangreiche Berücksichtigung sozial vulnerabler Gruppen, wie in vorliegender Arbeit geschehen, in Deutschland selten erreicht (z. B. WEIS et al. 2011, KURMUTZ et al. 2016). Die Erweiterung ist aufgrund der Datenverfügbarkeit jedoch nicht so umfangreich, wie dies wünschenswert wäre und es in US-amerikanischen Studien, die Zensus-Daten auf Block-Ebene nutzen, üblich ist (z. B. CUTTER et al. 2003, JOHNSON et al. 2012).

Im Gesamtbild der Klimawirkung zeigen sich die höchsten Werte im Stadtzentrum und verdichteten Stadtbereichen sowie in Bezirken mit Großwohnsiedlungen. Hier konzentrieren sich hitzesensitive Bevölkerung, Wärmeinseleffekt und Anzahl Heißer Tage. Die Bezirke mit der geringsten Klimawirkung finden sich im ländlich geprägten und naturnahen Raum abseits des Hauptsiedlungskörpers. Die stärkere Berücksichtigung der sozialen Vulnerabilität bewirkt überdurchschnittliche Klimawirkungen in Bezirken mit Großwohnsiedlungen, die als gut durchlüftet angenommen werden. Dies ist jedoch plausibel, da hier insgesamt mehr Menschen unter Wärmebelastung leiden und auch eine höhere Anzahl an Menschen stärker leiden, d. h. hitzesensitiver sind oder sich nicht adäquat schützen können. Eine vergleichbare Bewertung der Wärmebelastung für die Bevölkerung ist für Jena und in Thüringen bisher nicht vorgenommen wurden und somit ein Erkenntnisgewinn. KURMUTZ et al. (2016) verwenden den gleichen Ansatz für die Stadt Zwickau, betrachten aber nur ein Regionalklimamodell für die Zukunft. WEIS et al. (2011) stellen für die Region Stuttgart einen, hinsichtlich der verwendeten Daten, noch detaillierteren Bewertungsansatz vor, vermischen jedoch verschiedene Zeitebenen des Klimasignals mit dem Status quo der Sensitivität. Für die Region Phoenix, Arizona (USA), zeigen CHOW et al. (2012) getrennt für zwei Zeitschnitte auf Ebene der *cen-*

*sus tracts* (statistische Zählgebiete) die Hitzevulnerabilität der Bevölkerung und deren Veränderung auf. Jedoch werden hier nur fünfjährige Temperaturreihen verwendet und Klimasignal und Sensitivität nicht gleichgewichtig geometrisch aggregiert, sondern alle sieben genutzten Variablen linear aggregiert. AUBRECHT & ÖZCEYLAN (2013) kommen der hier verwendeten Methodik am nächsten. Sie nutzen Daten der sozialen Vulnerabilität, der Versiegelung und des Klimas und bilden einen Hitzestressindex durch geometrische Aggregation von Klimasignal und Sensitivität für die Gegenwart auf Ebene der *census blocks*, vergleichbar den statistischen Bezirken in Jena. Insgesamt verbindet der in der Arbeit entwickelte Ansatz die Vorteile der genannten Arbeiten und bietet zugleich einen konzeptionellen Rahmen zur Integration weiterer Zeitebenen und Klimawirkungen, der bisher für urbane Räume nicht vorlag.

Für die Zukunft ist von einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität der Klimawirkung auszugehen. Das bestätigen die projizierten Klimadaten für die DWD-Station Jena-Sternwarte, aber auch das ausgewertete Ensemble von Globalmodellen. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den Erkenntnissen anderer Arbeiten für Jena (GUDE et al. 2009, KURMUTZ et al. 2012, HOFFMANN et al. 2014) und Thüringen (TMLFUN 2013). Trotz der groben Auflösung kann auch ein Ensemble von Globalmodellen mit *RCP*-Szenarien einen belastbaren Trend liefern und besser zur Abschätzung der weiteren Entwicklung sein als ein oder wenige Regionalmodelle mit den älteren *SRE*-Szenarien. Die Veränderung der Sensitivität durch weiteren Flächenverbrauch und demographischen Wandel in Jena in den nächsten Dekaden wird durch Trends auf Landes- und Bundesebene gestützt (TLS 2014, 2015, SBA 2015a, 2015b). Bisher wurden diese Aspekte von der Anpassungsliteratur für Jena nur gestreift (HOFFMANN et al. 2014) und stellen einen fachlichen und praktischen Zugewinn für die Stadt dar. Für andere urbane Räume wird der demographische Wandel als Veränderung der Sensitivität erwähnt (BRANDL et al. 2011, SCHMIDT et al. 2011, STEINRÜCKE et al. 2013), jedoch nicht analysiert. Eine räumliche Differenzierung der künftigen Klimawirkung auf Ebene der statistischen Bezirke oder noch detaillierterer Teilräume ist mit den frei verfügbaren Daten nicht möglich und wurde bisher für Jena nur von HOFFMANN et al. (2014) mittels Wirkmodell für die Klimaperiode 2021-2050 und mit den älteren *SRE*-Szenarien umgesetzt.

### ***Trockenstress für die Vegetation***

Die Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* setzt sich aus den Teilkomponenten für Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume zusammen. Das Klimasignal ergibt sich aus der klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der ackerbaulichen bzw. forstlichen thermischen Vege-

tationsperiode auf der jeweiligen Fläche (Ackerfläche, Waldfläche, Ortslage). Für Ackerflächen reicht sie von -71 bis -144 mm mit den besten Werten auf den Höhen der Saaleplatte im Nordwesten der Stadt. Für Wald- und Stadtbäume sind es der Nordwesten und Südosten, wobei auf Waldflächen Werte von -99 bis -174 mm erreicht werden. Studien mit vergleichbarem Ansatz gibt es für Jena bisher nicht. GUDE et al. (2009) verwenden nutzungsunabhängig die Differenz aus Niederschlag und aktueller Verdunstung für das Sommerquartal 1971-2000, auch KURMUTZ et al. (2012) untersuchen nur das Sommerquartal 2021-2050. Die Thüringenstudie (TMLFUN 2013) unterscheidet zwar zwischen KWB in ackerbaulicher und forstlicher Vegetationsperiode, ist aber aufgrund vereinfachender Abgrenzung der Vegetationsperioden nicht vergleichbar. KURMUTZ et al. (2016) nutzen für Zwickau, ebenfalls die KWB in der ackerbaulichen und forstlichen Vegetationsperiode, ermitteln die KWB jedoch nicht auf Acker- und Waldflächen bezogen, sondern für die gesamte Fläche des Ortsteils. Die KWB in der Vegetationsperiode ist eine gebräuchliche Größe für derartige Fragestellungen, findet jedoch aufgrund der oft geringen Acker- und Waldflächen urbaner Räume eher in der regionalen Klimaanpassung Beachtung (z. B. SCHMIDT et al. 2011). Die vorliegenden Ergebnisse zur KWB beziehen sich explizit auf die jeweilige Flächennutzung und die taggenaue Länge der Vegetationsperiode, was eine höhere inhaltliche Genauigkeit gegenüber anderen Ansätzen bedeutet.

Als Sensitivität diene für Ackerflächen das pflanzenverfügbare Bodenwasser, was mangels Daten zum kapillaren Aufstieg durch die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum angenähert wurde (vgl. Kapitel 4.6.2). In der Folge könnten grundwassernahe Standorte als zu trockenstressgefährdet eingeschätzt werden. Trotzdem zeigen alle statistischen Bezirke mit Ackerflächen und potenziellem Grundwasseranschluss in der Saaleaue eine unterdurchschnittliche Sensitivität. Für Wald- und Stadtbäume wurde die Sensitivität über die Klimaarten-Matrizen (*KLAM-Wald*, *KLAM-Stadt*) nach ROLOFF & GRUNDMANN (2008) und ROLOFF et al. (2008) bestimmt. Das Bild der Sensitivität für Wald- und Stadtbäume im Stadtgebiet ist sehr heterogen, was eventuell durch unterschiedliche Bepflanzungspräferenzen begründbar ist. Nur eine weitere Studie für Jena berücksichtigt Sensitivitäten gegenüber Trockenstress, unterscheidet jedoch nicht zwischen Acker- und Waldflächen sowie Stadtbäumen (KURMUTZ et al. 2012). Für die Stadt Zwickau nutzen KURMUTZ et al. (2016) die gleichen Sensitivitäten, können jedoch für Ackerflächen auch auf Daten zum kapillaren Aufstieg zurückgreifen, was genauere Ergebnisse liefert. Studien für regionale Untersuchungsgebiete mit größeren Acker- und Waldanteilen nutzen als Sensitivitäten ebenfalls das pflanzenverfügbare Bodenwasser

(SCHMIDT et al. 2011) oder Bodenfeuchtestufen (WEIS et al. 2011). Eine Unterscheidung der Sensitivitäten mit der Detailliertheit des vorliegenden Ansatzes ist bisher für urbane Räume nicht durchgeführt worden.

Bei der Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* wurden Teilklimawirkungen für Acker- und Waldflächen sowie Stadtbäume differenziert, die zu einer Gesamtklimawirkung zusammengeführt werden. Für Ackerflächen tritt die stärkste Klimawirkung im Nordosten und Süden des Stadtgebietes auf, für Waldflächen im Norden und Nordosten und für Stadtbäume in der nördlichen Mitte und im Südwesten Jenas (vgl. Kapitel 4.6.3). KURMUTZ et al. (2012) verorten die schlechteste Wasserversorgung auf den bewaldeten Hochflächen im Westen und Südosten des Stadtgebietes. Die Arbeit unterscheidet jedoch keine Hauptbaumarten auf den Waldflächen. Für die Ackerflächen werden übereinstimmend mit vorliegender Arbeit die Bereiche mit dem geringsten Trockenstress auf den Hochflächen des Nordwestens und in der nördlichen Saaleaue verortet. Stadtbäume werden bei GUDE et al. (2009) und KURMUTZ et al. (2012) nicht betrachtet, so dass vorliegende Arbeit neue Erkenntnisse für Jena liefert. Außerhalb Jenas ist nur die Anwendung des Ansatzes auf die Stadt Zwickau vergleichbar (KURMUTZ et al. 2016). Für regionale Untersuchungsgebiete mit größeren Acker- und Waldanteilen leiten SCHMIDT et al. (2011) durch eine Verknüpfung von Klimasignal und Sensitivität in einer Wertematrix eine Vulnerabilität von Waldflächen gegenüber Trockenphasen sowie eine Vulnerabilität landwirtschaftlicher Böden gegenüber Austrocknung her. Dieses Vorgehen benötigt jedoch Expertenwissen und reduziert den Wertebereich der Klimawirkung auf jeweils vier Klassen. Die Gesamtklimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* als Kombination der Teilklimawirkungen zeigt die höchsten Werte im Norden und Nordosten des Stadtgebietes, während die geringsten Werte vor allem im Nordwesten und Südosten der Stadt aufgrund besserer KWB und Böden zu finden sind. Für die Integration einzelner Trockenstresskomponenten in eine Gesamtbewertung liegen bisher, für Städte allgemein und für Jena speziell, keine vergleichbaren Ansätze vor, so dass die vorliegende Methodik einen ersten Vorschlag darstellt.

Künftig ist von einer Verstärkung der Klimawirkung auf Acker- und Waldflächen sowie für Stadtbäume auszugehen. Die klimatische Wasserbilanz wird sich aufgrund steigender Temperaturen verschlechtern. Sowohl die projizierten Klimadaten der DWD-Station Jena-Sternwarte als auch das Ensemble von Globalmodellen deuten darauf hin. Zusätzlich könnte sich die Dauer von Trockenperioden leicht verlängern. Zu einer insgesamt ähnlichen Einschätzung kommen Studien für die Stadt Jena und den Freistaat Thüringen (KURMUTZ et al. 2012,

TMLFUN 2013). Ein Ensemble von Globalmodellen mit *RCP*-Szenarien kann demnach auch für die Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* für eine klimatische Trendanalyse herangezogen werden, sowohl für Jena als auch für andere urbane Räume. Bei der künftigen Veränderung der Sensitivität ist zwischen den Teilklimawirkungen zu differenzieren. Die Bodeneigenschaften auf Acker- und Waldflächen können als konstant angenommen werden, während sie sich für Stadtbäume durch zunehmende Versiegelung und Leitungsbau verschlechtern könnten. Der steigende Flächenverbrauch in der Stadt Jena kann dafür als Indiz gelten (TLS 2015). Verringern könnte sich die Sensitivität des Baumbestandes durch Neupflanzungen trockenstresstoleranter Arten, wie sie ROLOFF et al. (2008) und KNOPF et al. (2016) umfangreich vorschlagen. Eine räumliche Differenzierung der künftigen Klimawirkung ist mit den verfügbaren Daten nicht möglich.

### ***Überschwemmungen durch Starkregen***

Als klimatischer Input für die Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* wurde das Sturzflutpotenzial konvektiver Zellen im Sommerhalbjahr verwendet. Über das Stadtgebiet verstreut zeigen sich Inseln mit höheren Werten. Ob das sehr heterogene Verteilungsmuster auf den kurzen Datenzeitraum (2004-2010, vgl. Kapitel 4.7.1) zurückzuführen ist oder tatsächlich so kleinräumig unterschiedlich ausfällt, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. In Studien für das Gebiet Jena wurden Starkniederschlagsereignisse bisher nicht mit flächenhaften Klimadaten untersucht. In der Thüringenstudie (TMLFUN 2013) werden lokale Überschwemmungen durch Starkregen aufgrund des Maßstabs nicht näher betrachtet. Indikatoren für andere starkregenbezogene Fragestellungen sind hier Tagesniederschläge von 20 und 50 mm. STEINRÜCKE et al. (2013, 2016) verwenden für die Ermittlung von Belastungsgebieten bzgl. Extremniederschlägen kein gesondertes Klimasignal. Für die Stadt Zwickau verwenden KURMUTZ et al. (2016) die jährliche Anzahl an Starkregentagen, die sie oberhalb des 95. Perzentils der Tagesniederschläge verorten und je nach Lage im Stadtgebiet zwischen 25 und 30 mm entspricht. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Bearbeitung der Klimawirkung in der Fläche der Datensatz des Sturzflutpotenzials im Sommerhalbjahr ausgewählt, da er thematisch besser geeignet ist als eine gesamtjährliche Anzahl von Starkregentagen.

Die Bestimmung der Sensitivität erfolgte über ein Wirkmodell, da Indikatorenansätze bei der Abbildung dynamischer Vorgänge, wie sie Überschwemmungen bzw. Sturzfluten darstellen, an ihre Grenzen kommen. Als Variablen der Sensitivität wurden die Ergebnisse einer Überschwemmungsmodellierung in Form der Überflutungsflächengröße und Überflutungshöhe im

statistischen Bezirk zum Sensitivitätsindikator verknüpft. Im Ergebnis zeigen vor allem die Bezirke mit geringem durchschnittlichen Gefälle und hoher durchschnittlicher Versiegelung in Tallage hohe Sensitivitäten. Unterdurchschnittliche Sensitivitäten treten eher in ländlich geprägten Bezirken mit wenig Flächenversiegelung auf. In den für Jena bestehenden Arbeiten wurden lokale Überschwemmungen infolge Starkregen nicht flächenhaft analysiert und somit auch keine Sensitivitäten bestimmt. KURMUTZ et al. (2016) verwenden für die Analyse der Sturzfluten durch Starkregen in der Stadt Zwickau in ihrem Indikatorenansatz einen Versiegelungsindex und die mittlere Hangneigung als Sensitivitäten. Diese Variablen stellen wichtige Steuergrößen der Sensitivität dar, können ein Wirkmodell jedoch nicht ersetzen. Für die Städte Bochum und Emmerich sehen STEINRÜCKE et al. (2013, 2016) die Sensitivitäten gegenüber Starkregenereignissen in den Hauptfließwegen des freien Oberflächenabflusses sowie abflusslosen Senken, die sie über hydrologische Funktionen eines GIS ableiten. Fließwege und Senken sind auch das Ergebnis vergleichbarer Studien in anderen Städten (z. B. CASTRO et al. 2008b, VISSER 2009, SCHEID et al. 2013). TYRNA & HOCHSCHILD (2010a, 2010b) verwenden dasselbe hier genutzte Wirkmodell für eine kleine Gemeinde sowie das Stadtzentrum Tübingens, erzielen jedoch aufgrund des kleineren Untersuchungsgebietes Ergebnisse in höherer räumlicher Auflösung. Die Bestimmung der Sensitivität mittels Überschwemmungsmodellierung durch *r.sim.water* liefert genauere Ergebnisse als ein Indikatorenansatz zur Frage, welche Flächen und Bezirke überschwemmungssensitiv sind. Die hier erstmals durchgeführte gesamtstädtische Anwendung des Wirkmodells bedingt eine geringere räumliche Auflösung der Ergebnisse im Vergleich zu kleineren Untersuchungsgebieten (z. B. HOFIERKA et al. 2002, TYRNA & HOCHSCHILD 2010a, ALLE et al. 2011). Die Ergebnisse sind jedoch für Aussagen auf Ebene von statistischen Bezirken oder Ortseilen ausreichend genau.

Die Klimawirkung ergab sich aus der Verknüpfung von überschwemmungssensitiven Flächen und dem sommerlichen Sturzflutpotenzial. Im Ergebnis zeigt sich ein heterogenes Bild. Es existieren zwei städtische Bereiche mit stark überdurchschnittlicher Klimawirkung, in der Mitte und im Süden des Stadtgebietes von Jena. Gleichzeitig befinden sich in räumlicher Nähe Bezirke mit stark unterdurchschnittlicher Klimawirkung. Ein Grund für diese benachbarten Extreme könnte das kleinräumig variierende Sturzflutpotenzial sein. Es wurde versucht, das räumliche Muster der Klimawirkung mittels Daten zu Feuerwehreinsätzen aufgrund Starkregen zu validieren. Hier zeigte sich eine geringe bis mittlere Übereinstimmung. Während eine Einsatzhäufung in der nördlichen Stadtmitte mit der ermittelten Klimawirkung korreliert, wurden im Süden Jenas, dem zweiten Bereich mit stark überdurchschnittlicher Klimawirkung,



keine Feuerwehreinsätze aufgrund von Starkregen registriert, was unterschiedliche Gründe haben kann (vgl. Kapitel 4.7.3): Einerseits berücksichtigt das verwendete Wirkmodell kein Kanalnetz bei der Überschwemmungsmodellierung, andererseits können bei der Auswertung der Feuerwehrdaten nicht alle Starkregeneinsätze anhand der umgangssprachlichen Einsatzbeschreibungen korrekt zugeordnet worden sein. KURMUTZ et al. (2016) verwenden für die Stadt Zwickau ebenfalls einen Indikatorenansatz zur Bestimmung der Klimawirkung. In den meisten Studien wird kein explizites Klimasignal verwendet und somit keine Klimawirkung, im Sinne des hier verwendeten methodischen Ansatzes, bestimmt. Die Studien verwenden in diesen Fällen das Ergebnis des jeweiligen Wirkmodells ohne weitere Verarbeitung, was nach vorliegendem Ansatz eher der Sensitivität entspricht (z. B. VISSER 2009, TYRNA & HOCHSCHILD 2010b, STEINRÜCKE et al. 2013, 2016). Aufgrund dessen ist ein Vergleich mit der hier ermittelten Klimawirkung inhaltlich schwierig. Die Bestimmung der Klimawirkung nach vorliegendem Konzept ist inhaltlich umfangreicher und erweitert die einfache Überflutungsmodellierung um die Komponente Klima. Die verwendete Methodik bietet somit einen neuen Ansatz der Operationalisierung der Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* für urbane Räume.

Bis Ende des Jahrhunderts ist eine Verstärkung der Klimawirkung wahrscheinlich. Die zwei Regionalklimamodelle *STAR2* und *WETTREG2010* mit den älteren *SRE*-Szenarien, die für die DWD-Station Jena-Sternwarte ausgewertet wurden, zeigen keine signifikanten Trends. Demgegenüber weisen alle ausgewerteten *RCP*-Szenarien der Globalmodelle im Mittel eine Zunahme auf, sowohl für die Tage ab 20 mm Niederschlag, als auch für die Jahresniederschlagssumme der Regentage über dem 99. Perzentil. Zugleich sind Projektionen der Klimamodelle für Extremereignisse weniger belastbar als z. B. für die Veränderung der Jahresmitteltemperatur. GUDE et al. (2009) stellen für Jena eine leichte Abnahme der Starkregenereignisse bis Mitte des Jahrhunderts fest, die sie anhand *WETTREG2006*-Projektionen für die Tagesschwellenwerte von 10, 20 und 30 mm untersuchen. Nach TMLFUN (2013) ergibt sich eine leichte Zunahme der Tage mit mehr als 50 mm Niederschlag in der Region Jena zum Ende des Jahrhunderts für das Regionalklimamodell *CLM*. BRENDDEL et al. (2014) rechnen aufgrund einer Wetterlagenanalyse und expliziter Simulationen konvektiver Ereignisse für das mit *RCP8.5* betriebene Regionalklimamodell *CLM* mit einer Zunahme des Gefährdungspotenzials durch konvektive Unwetter, inklusive des Sturzflutpotenzials. Eine künftige Veränderung der Sensitivität in Form der Überschwemmungsfläche und Überflutungshöhe ist an die Veränderung der Versickerungsmöglichkeit des Regenwassers und somit an eine Veränderung der Landnut-

zung gekoppelt. Aufgrund des bisherigen Trends der Zunahme versiegelter Flächen in Jena und des wahrscheinlich weiteren Wachstums der Stadt (TLS 2014, 2015), ist künftig von einer Zunahme überschwemmungsgefährdeter Flächen auszugehen. Eine räumliche Differenzierung der künftigen Klimawirkung auf Ebene der statistischen Bezirke ist nach derzeitigem Datenstand nicht möglich.

### ***Gesamtklimawirkung***

Die ermittelten Klimawirkungen werden in einer Gesamtbewertung zusammengefasst (vgl. Kapitel 4.8). Die höchste Gesamtklimawirkung wird für Jena in der Klimaperiode 1981-2010 in den städtisch geprägten Bezirken entlang der Saaletalachse erreicht, vor allem im und um das Stadtzentrum sowie im Süden der Stadt. Die geringste Gesamtklimawirkung zeigt sich in den ländlich geprägten Bezirken, insbesondere auf den Hochflächen im Westen und Nordwesten des Stadtgebietes. Es zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen absoluter, relativer und kombinierter Gesamtklimawirkung gering sind, da in den meisten statistischen Bezirken die gleichen (Teil-)Klimawirkungen auftreten. Stärkere Abweichungen zwischen absoluter, relativer und kombinierter Gesamtklimawirkung stellen sich erst ein, wenn Klimawirkungen einbezogen werden, die auf wenige statistische Bezirke im Stadtgebiet beschränkt sind, z. B. *sommerliches Niedrigwasser an Vorflutern* oder *Erosion auf Ackerflächen durch Starkregen*. Das räumliche Muster der Gesamtklimawirkung ist demnach abhängig von den untersuchten Klimawirkungen und kann nicht verallgemeinert werden. Mit der Anzahl der untersuchten Klimawirkungen steigt jedoch die Aussagekraft des räumlichen Verteilungsmusters der Gesamtklimawirkung, was die Bedeutung der Modularität und Erweiterbarkeit des verwendeten methodischen Ansatzes unterstreicht. Für die Gegenwart (1981-2010) bestimmen KURMUTZ et al. (2016) einen Mittelwert der Betroffenheit der untersuchten Klimawirkungen auf Stadtteilbene für die Stadt Zwickau. Weitere Arbeiten für andere Städte, die einen Ansatz nutzen, welcher der hier vorgestellten Methode vergleichbar ist, sind nicht bekannt. Dies liegt auch daran, dass für Städte selten eine Bandbreite an Klimawirkungen untersucht wird, die eine Aggregation zwecks Gesamtbewertung nahelegt, sondern sich auf einzelne Aspekte, wie z. B. Wärmebelastung oder Starkregen, konzentriert wird (z. B. UASN 2012, PTAK et al. 2013, STEINRÜCKE et al. 2013, 2016). Für die Gemeinden der Region Lissabon bestimmen GUILLARD-GONÇALVES et al. (2014) potenzielle räumliche Auswirkungen von sechs Naturgefahren und aggregieren sie zu einer Risikozonen-Karte mit fünfstufiger Klassifizierung. Auf der Landkreis-Ebene zeigen SCHMIDT-THOMÉ & GREIVING (2013) die Anwendung einer Gesamtklimawirkung in Form eines *aggregate potential impact of climate change* für Europa

inklusive kartografischer Darstellung in sechs Klassen. Dabei integrieren sie in ihre Gesamtklimawirkung bereits das klimatische Veränderungssignal, fassen also die Zeitebenen der Referenzperiode (1961-1990) und der Zukunft (2071-2100) zusammen, was einem anderen konzeptionellen Verständnis entspricht. Die vorliegenden Ergebnisse zur Gesamtklimawirkung demonstrieren die Anwendung einer integrierten Gesamtbewertung auf kommunaler Ebene, wie sie bisher ansatzweise nur für die Stadt Zwickau existiert (KURMUTZ et al. 2016).

Für Karten künftiger Klimawirkungen im Betrachtungszeitraum 2071-2100 auf Ebene der statistischen Bezirke existieren für Jena derzeit keine räumlich ausreichend genauen und belastbaren Daten, womit eine Karte zur künftigen Gesamtklimawirkung ebenfalls nicht erstellt werden kann. Für die künftige Veränderung der Gesamtklimawirkung wurden daher die Ergebnisse der Trendanalysen der Klimasignale und Sensitivitäten zusammenfassend bewertet. Danach ist eine Verstärkung der untersuchten Klimawirkungen in den statistischen Bezirken Jenas für die Zukunft wahrscheinlich und somit ebenfalls für die Gesamtklimawirkung. Auch KURMUTZ et al. (2016) führen für die Stadt Zwickau eine qualitative Trendanalyse zur künftigen Veränderung von Klimasignal und Sensitivität für sieben Klimawirkungen auf Stadtbezirksebene durch, bewerten jedoch keine künftige Gesamtklimawirkung. Allgemein wurden auf kommunaler Ebene bisher keine Ergebnisse für eine künftige Gesamtklimawirkung in räumlicher Auflösung von Stadtteilen oder vergleichbaren Teilräumen vorgelegt. Daher sollte für Jena vorerst pragmatisch davon ausgegangen werden, dass die räumlichen Verteilungsmuster der Gesamtklimawirkung, ebenso wie die der einzelnen Klimawirkungen, auch künftig erhalten bleiben, jedoch die Stärke der Klimawirkung zunehmen wird.

In Bezug zur eingangs aufgestellten These

- (2a) Die bedeutendsten Auswirkungen sind die Wärmebelastung für die Bevölkerung, sommerlicher Trockenstress für die Vegetation und Überschwemmungen aufgrund von Starkniederschlagsereignissen.

kann festgestellt werden, dass die untersuchten Klimawirkungen mit großer Wahrscheinlichkeit die bedeutendsten Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels auf die Stadt Jena darstellen. In der Arbeit wurden nicht alle tatsächlich auftretenden Klimawirkungen untersucht, sondern sich auf drei Auswirkungen beschränkt. Die Annahme, dass es sich dabei um die drei wichtigsten Klimawirkungen handelt, basiert auf der naturräumlichen Ausstattung des Untersuchungsgebietes und den beobachteten und projizierten Klima- und Sensitivitätsände-

rungen. Gleichzeitig wird die Bedeutung der ausgewählten Klimawirkungen von früheren Studien zum Klimawandel im Raum Jena gestützt. Auch zeigt der Forschungsstand zu den Klimawirkungen, welche gesundheitlichen und wirtschaftlichen Schäden mit ihnen bereits heute, aber vor allem künftig verbunden sind (vgl. Kapitel 2.4.1, 2.5.1, 2.6.1). Auf Basis des Forschungsstandes kann weiterhin gefolgert werden, dass die drei untersuchten Klimawirkungen – für den Trockenstress jedoch nur die Teilklimawirkung der Stadtbäume – auch für andere mitteleuropäische Binnenstädte zu den bedeutendsten Auswirkungen des Klimawandels zählen dürften.

Auch die These

- (2b) Die Herausforderungen dieser Auswirkungen sind nicht neuartig, sondern entstehen aus Veränderungen der Intensität und Häufigkeit bekannter, bereits heute bestehender, Problemlagen.

kann bestätigt werden. Die bedeutenden Klimawirkungen treten bereits heute in Jena und anderen urbanen Räumen auf und verursachen gesundheitliche und wirtschaftliche Schäden. Es wurde gezeigt, dass sich die Klimawirkungen wahrscheinlich künftig im Zuge von Klima- und Sensitivitätsänderungen in ihrer Häufigkeit und Intensität im Raum Jena verstärken werden. Dies kann sich klimaseitig z. B. durch häufigere und ergiebigere Starkregen ausdrücken, während sich die Sensitivität z. B. durch zunehmende Flächenversiegelung erhöht. Im Ergebnis wird dies zu größeren Schäden führen, sollten die Sensitivitäten nicht durch Anpassungsmaßnahmen gesenkt werden.

## **6.4 Planungshinweise**

Für die Erstellung von punkt- und flächenhaften Planungshinweisen wurde die Betrachtungsebene der statistischen Bezirke verlassen und die Basisdaten der Klimasignale und Sensitivitäten in ihrer ursprünglichen Auflösung verwendet und zusätzliche relevante Informationen hinzugefügt. Hochaufgelöste Daten, wie das Baumkataster, bedürfen einer weiteren Verarbeitung oder einer Karte großen Maßstabs, um sinnvoll verwendet zu werden. Auch stellt sich die Frage, für welche Flächenkulisse Planungshinweise gegeben werden sollen. Somit müssen einerseits Flächen nach festzulegenden Kriterien priorisiert werden und diese Flächen andererseits für die Verwendung in einer Planungshinweiskarte kartografisch aufbereitet werden. Bei der Priorisierung für Jena wurden alle Flächen ausgewählt, die bereits heute eine statistisch überdurchschnittliche Klimawirkung aufweisen. Für diese Flächen ist künftig eine starke

Betroffenheit durch Klimawirkungen wahrscheinlich. Die Priorisierung führte zu einer Reduzierung des ursprünglichen Flächenumfangs auf ca. 40 % für die Wärmebelastung, ca. 23 % für den Trockenstress und ca. 19 % für die lokalen Überschwemmungen. In den ungleichen Anteilen spiegelt sich die unterschiedlich hohe räumliche Auflösung der Sensitivitätsdaten wieder, die von den demographischen und sozio-ökonomischen Daten auf Bezirksebene bei der Wärmebelastung bis zu Überflutungsflächen im Meterbereich bei den lokalen Überschwemmungen reicht. KURMUTZ et al. (2012) verwenden für ihre Planungshinweiskarte für Jena zur Priorisierung besonders betroffener Bereiche für jede einzelne Klimawirkung eigene Kriterien, die sich auf das Klimasignal oder die Sensitivitäten beziehen, z. B. Flächen mit einer jährlichen Anzahl an Sommertagen über einem Schwellwert  $x$ . Da jedoch keine allgemeingültigen Bewertungsmaßstäbe für Klimawirkungen existieren, ist eine Festlegung von Schwellwerten meist subjektiv. STEINRÜCKE et al. (2013, 2016) nehmen die Flächenauswahl für ihre *Handlungskarte Klimaanpassung* auf Basis von Sensitivitäten vor. Für die Wärmebelastung werden Kriterien der Wärmeinsel und der Demographie herangezogen. Für lokale Überschwemmungen sind dies Hauptfließwege in der Nähe zu stark versiegelten Flächen sowie abflusslose Senken. Im vorliegenden Ansatz werden dagegen methodisch konsistent Flächen ausgehend von den Klimawirkungen anhand von statistischen Lage- und Streuungsparametern, d. h. Mittelwert und Standardabweichung, priorisiert.

Für die Kartendarstellung wurden die priorisierten Flächen der Klimawirkungen nachfolgend jeweils einer differenzierten Generalisierung unterzogen. Dabei wurden die angesprochenen Kleinstflächen des Baumkatasters zur besseren optischen Wahrnehmung vergrößert. Die Flächenkulisse der *Wärmebelastung für die Bevölkerung* bleibt weiterhin grob im Vergleich zu den anderen Klimawirkungen. Bei KURMUTZ et al. (2012) wurde keine Generalisierung der Flächenkulissen vorgenommen, da die Spannweite der räumlichen Auflösung der verwendeten Daten geringer ist als in dieser Arbeit. Gleichzeitig wurden bei KURMUTZ et al. (2012) jedoch die Klimawirkungen *Trockenstress für Stadtbäume* und *Überschwemmungen durch Starkregen* nicht analysiert, so dass keine so detaillierten Daten anfielen. Bei STEINRÜCKE et al. (2013, 2016) wird keine weitere Bearbeitung der Flächenkulisse beschrieben.

Neben den eigentlichen Klimawirkungen wurden relevante Zusatzinformationen in die vorliegende Karte integriert, die im Zusammenhang mit den Klimawirkungen Bedeutung besitzen. Dazu gehören Kaltluftbahnen, Einrichtungen mit besonders hitzesensitiven Personengruppen, Feuerwehreinsatzorte nach Starkregen sowie erosive Fließbahnen. Auch KURMUTZ et al. (2012) integrieren Zusatzinformationen wie Kaltluftbahnen und Feuerwehreinsatzorte in ihre

Planungshinweiskarte. STEINRÜCKE et al. (2013, 2016) verwenden in ihren *Handlungskarten Klimaanpassung* für Bochum und Emmerich zusätzlich Luftleitbahnen und schutzwürdige Grün- und Freiräume.

Für die Klimawirkungen wurden je nach räumlichem Kontext Zielstellungen für die Klimaanpassung aufgestellt. Die Zielstellungen fokussieren auf die Senkung der Sensitivitäten, da das Klimasignal weitgehend unbeeinflussbar ist. Für jede Zielstellung wurde eine Empfehlungsgruppe definiert und geeignete Anpassungsmaßnahmen zugeordnet. Die Handlungsempfehlungen entsprechen der gängigen Praxis, da bekannte Klimawirkungen den Vorteil besitzen, dass auch gebräuchliche Gegenmaßnahmen zur Anwendung kommen können. Die empfohlenen Maßnahmen entstammen der Maßnahmendatenbank *JELKA* des *JenKAS*-Projektes (KURMUTZ et al. 2012).

In der *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* wurden die Flächenkulissen der Klimawirkungen und Zusatzinformationen dargestellt und mit den Planungshinweisen verknüpft. Die Legende bietet Informationen zu Klimawirkungen, Zielstellungen und Empfehlungsgruppen. Im Gegensatz dazu stellen STEINRÜCKE et al. (2013) auf ihrer *Handlungskarte Klimaanpassung* für Bochum keine Handlungsanweisungen bereit, sondern beschränken sich auf die Darstellung der Gefährdungspotentiale, die am ehesten den Sensitivitäten entsprechen. Für die *Handlungskarte Klimaanpassung* der Stadt Emmerich verknüpfen STEINRÜCKE et al. (2016) jedoch die Konfliktpotenziale mit Maßnahmenempfehlungen.

In vorliegender *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* ergaben sich Flächen mit Überlagerung von bis zu drei möglichen Klimawirkungen. Derartige Kombinationen wurden zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung auf zwei Klimawirkungen reduziert. Dabei erhielten die Klimawirkungen mit der höchsten räumlichen Auflösung den Vorrang. Hier wäre eine Methode zur – auch kleinräumigen – Darstellung aller drei Klimawirkungen wünschenswert. Im Rahmen dieser Studie war die Erarbeitung umfangreicher Darstellungsvorschriften, wie sie für stadtklimatische Fragestellungen von der VDI-KRL (2008) aufgezeigt werden, jedoch nicht möglich. STEINRÜCKE et al. (2013, 2016) verwenden zur Darstellung Flächensignaturen inkl. Schraffuren und Punktierungen sowie Pfeilsymbole. KURMUTZ et al. (2012) nutzen Punkt- und Flächensignaturen und beschriften diese mit den Kürzeln der Empfehlungsgruppen. Dies wurde in vorliegender Planungshinweiskarte vermieden, da die Signaturen eindeutig zuordenbar sind. Gleichzeitig verringert dies die Gefahr einer Überfrachtung der Karte. Flächen, auf die zwei Zielstellungen bzw. Empfehlungsgruppen zutreffen, wurden in vorlie-

gender Karte schraffiert dargestellt. Bei Betrachtung der *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* fällt auf, dass für einen großen Teil der verdichteten städtischen Bereiche Empfehlungen in Bezug auf die *Wärmebelastung für die Bevölkerung* ausgesprochen wurden. Dies betrifft auch zwei Flächen mit Sportstätten und Campingplatz, für die dies nicht gerechtfertigt ist. Hier wirkt sich die Verknüpfung von geringem bis mittlerem, flächenbezogenem Wärmeinselindex und überdurchschnittlicher hitzesensitiver Bevölkerung auf Bezirksebene ungünstig aus. Dies könnte durch räumlich höher aufgelöste demographische und sozio-ökonomische Daten vermieden werden. Sollten diese nicht verfügbar sein, könnte ein Abgleich der Flächenkulisse mit Landnutzungsdaten oder Klimatopen Abhilfe schaffen. Dies würde jedoch dem Anliegen eines halb-automatisierten Arbeitsablaufs ohne subjektive Einflüsse des Bearbeiters widersprechen. Hier besteht hinsichtlich der verwendeten Methoden und des Arbeitsablaufs Verbesserungsbedarf. Die Flächenkulisse des *Trockenstresses für die Vegetation* ist in Bezug auf die Acker- und Waldflächen der Karte in Form und Detailgrad angemessen. Die Flächenkulisse der Stadtbäume ist trotz Zusammenfassung und Vergrößerung sehr kleinteilig und verliert sich oft in den großflächigen Empfehlungen zur Wärmebelastung. Hier sollte die kartografische Darstellung verbessert und ggf. größere Mindestflächengrößen für Empfehlungen festgesetzt werden. Die Flächenkulisse der *Überschwemmungen durch Starkregen* ist aufgrund der guten Ausgangsdaten sehr detailliert. Auch diese Flächen könnten darstellerisch besser hervorgehoben bzw. stärker generalisiert werden. Die Kaltluftbahnen fügen sich darstellerisch gut in die Karte ein, führen aber in Bereichen mit mehreren flächenhaften Planungsempfehlungen teilweise zu Unübersichtlichkeit. Die punkthaften Planungsempfehlungen wurden mittels Punktsignaturen in assoziativen Farben dargestellt. Hier könnte versucht werden, die Punktsignaturen durch schwarze Piktogramme zu ersetzen, um die Anzahl der verwendeten Farben zu reduzieren und somit einer farblichen Überfrachtung entgegenzuwirken. Eine Reduzierung der Farbenanzahl ist ebenso hilfreich, wenn weitere Klimawirkungen analysiert und entsprechende Planungsempfehlungen in die Karte aufgenommen werden sollten. Insgesamt wurden für die drei Klimawirkungen für etwa ein Viertel des Stadtgebietes Planungsempfehlungen ausgesprochen. Im Vergleich kommen KURMUTZ et al. (2012) hier auf einen wesentlich höheren Anteil, da sie auch für Flächen mit Erosionsgefährdung und Überschwemmungsgebiete der Saale Planungsempfehlungen geben. Die Karten von STEINRÜCKE et al. (2013, 2016) für Bochum und Emmerich weisen geringere Anteile der Stadtgebiete mit Planungsempfehlungen auf, als in der vorliegenden Arbeit. Dies dürfte daran liegen, dass sie nur zwei Themen untersuchen, Wärmebelastung und lokale Überschwemmungen.

Neben den angesprochenen Kartenwerken von KURMUTZ et al. (2012) und STEINRÜCKE et al. (2013, 2016), die als Planungshinweiskarten zur Klimaanpassung kategorisiert werden können, gibt es weitere Karten, die eine ähnliche Funktion erfüllen und als Vergleichsmaterial herangezogen werden können. Die *Fachkarte Klimaanpassung* der Stadt Hannover umfasst u. a. die Themen Hitzebelastung, Überschwemmungen durch Starkregen und Trockenstress für die städtische Vegetation (STHA 2012, SCHMIDT 2016). Da sie jedoch nicht öffentlich zugänglich ist, konnte sie nicht in Bezug auf die hier erstellte *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* diskutiert werden. Auch für Berlin existieren im *Stadtentwicklungsplan Klima* zwei einzelne Maßnahmenkarten zu Bioklima sowie zu Gewässerqualität und Starkregen. Aufgrund des fehlenden integrativen Charakters wurden diese Karten nicht näher untersucht.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die vorgestellte *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* einen wertvollen Schritt zur besseren Berücksichtigung von potenziellen Auswirkungen des Klimawandels in der Stadtplanung darstellt. Bisher wurde auf kommunaler Ebene nichts Vergleichbares vorgelegt. Andere Ansätze erreichen entweder nicht den thematischen Umfang oder basieren nur auf Klimasignalen bzw. Sensitivitäten, anstatt sich inhaltlich umfassender auf Klimawirkungen zu beziehen.

Die eingangs gestellte These

- (3a) Besonderer Handlungsbedarf besteht in den verdichteten Stadtbereichen, wo sich Klimawirkungen räumlich überlagern.

stimmt mit den Ergebnissen der Arbeit überein. Bei der Erstellung der *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* hat sich gezeigt, dass in Jena viele städtische Bereiche existieren, in denen sich mehrere Klimawirkungen räumlich überlagern, z. B. überwärmte Bereiche mit Stadtbäumen unter Trockenstress und gelegentlichen Überschwemmungen durch Starkregen. Diese Flächen finden sich insbesondere in verdichteten Stadtbereichen wie dem Stadtzentrum Jenas. In diesen Gebieten sollten Anpassungsmaßnahmen vordringlich umgesetzt werden, vor allem multifunktionale Maßnahmen, die mehrere Klimawirkungen adressieren. Aufgrund des Forschungsstandes kann allgemein festgestellt werden, dass sich in verdichteten urbanen Räumen viele Klimawirkungen konzentrieren und dass Anpassungsmaßnahmen in diesen Bereichen prioritär umgesetzt werden sollten.



Die zuletzt genannte These

- (3b) Eine Planungshinweiskarte zur Klimaanpassung ermöglicht die Vermittlung der räumlich differenzierten Handlungsbedarfe und Anpassungsoptionen an Stadtplaner und städtische Akteure.

kann bestätigt werden. Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten sind seit Jahrzehnten etablierte Werkzeuge mit denen Klimatologen planungsrelevantes Wissen zum Stadtklima an Stadtplaner und andere kommunale Akteure vermitteln und mit denen sie helfen, ein gesünderes städtisches Klima zu schaffen. In Zeiten des anthropogenen Klimawandels ist es eine konsequente Weiterentwicklung, diese vorhandene Plattform zu nutzen und Informationen zu den räumlichen Auswirkungen des Klimawandels zu integrieren bzw. eigenständige *Planungshinweiskarten Klimaanpassung* zu erstellen. Derartige Karten eignen sich nicht nur für Jena, sondern auch für andere Städte, da die Karteninhalte an die jeweils vor Ort relevanten Klimawirkungen angepasst werden können. Gleichzeitig müssen die Anwender bei der Arbeit mit einer solchen Karte die Qualität der zugrundeliegenden Daten berücksichtigen, um eine Überinterpretation der dargestellten Klimawirkungen zu vermeiden.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit ist es, einen Beitrag zur Methodenentwicklung im Bereich der Klimafolgenanalyse und der Ableitung von Planungshinweisen zur Klimaanpassung im urbanen Raum, am Beispiel der Stadt Jena, zu liefern. Hierbei sollte mit Hilfe von, für Kommunen, frei verfügbaren Daten und unter Verwendung von Standardsoftware, Klimawirkungen, die durch den anthropogenen Klimawandel verstärkt werden, herausgearbeitet und räumlich differenzierte Planungshinweise abgeleitet werden. Als Zielgruppe der zu erarbeitenden Methodik sind Mitarbeiter kommunaler Fachbehörden sowie andere städtische Akteure zu sehen.

Zahlreiche Beobachtungen zeigen, dass sich das Klima auf der Erde seit Mitte des 20. Jahrhunderts signifikant verändert. Auswirkungen sind u. a. ein Anstieg der globalen Lufttemperatur und des Meeresspiegels, der Rückgang von Gletschern und Eisschilden und die Zunahme von Wetterextremen. Heute besteht ein breiter wissenschaftlicher Konsens darüber, dass der Mensch durch Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre diese Veränderungen herbeigeführt hat. Geht der Ausstoß an Treibhausgasen im bisherigen Ausmaß weiter, werden sich die beobachteten Veränderungen im Klimasystem fortsetzen und verstärken.

Urbane Räume spielen aufgrund der Konzentration von Menschen, Infrastrukturen und Wirtschaftsaktivitäten eine besondere Rolle in Bezug auf den Klimawandel. Viele kommunale Handlungsfelder sind direkt oder indirekt von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Bestehende stadtklimatische Effekte werden durch die Klimaveränderungen verstärkt. Steigende sommerliche Temperaturen wirken sich durch die städtische Wärmeinsel im urbanen Raum intensiver aus als im Umland und resultieren in einer steigenden Wärmebelastung für die Bevölkerung. Urbane Standorte werden infolge des geringeren Wasserangebots zunehmend zum Problem für das städtische Grün. Häufigere und intensivere Starkregenereignisse führen in hochversiegelten Innenstädten vermehrt zu lokalen Überschwemmungen.

Die Raumplanung spielt eine Schlüsselrolle bei der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels. Aufgrund der Raumbedeutsamkeit und des Bezugs zur Bodennutzung können Stadtplaner mit Hilfe rechtlicher Instrumente die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen befördern. Als Schnittstelle zwischen Klimatologen und Planern sowie zur Informationsvermittlung an Politik und Öffentlichkeit eignen sich Karten besonders gut. Klimaanalyse- und Planungshinweiskarten haben sich seit Jahrzehnten im Planungsalltag bewährt. Die Erweiterung dieser Kartenwerke um Aspekte des Klimawandels erscheint daher nur konsequent.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stadt Jena wurden anhand von drei bedeutenden urbanen Klimawirkungen untersucht: *Wärmebelastung für die Bevölkerung*, *Trockenstress für die Vegetation* sowie *Überschwemmungen durch Starkregen*. Die Analyse wurde unter Verwendung eines Geoinformationssystems (GIS) und einer Tabellenkalkulation durchgeführt und orientiert sich am Vulnerabilitätskonzept des IPCC (2007) und dessen Interpretation durch BUTH et al. (2015) und GREIVING et al. (2015). Gleichzeitig wurde das Konzept in vorliegender Arbeit weiterentwickelt. Im Ergebnis wurden die Klimawirkungen für die Gegenwart, d. h. die Klimaperiode 1981-2010, für die 41 statistischen Bezirke Jenas mittels Indikatorenansätzen untersucht und zu einer Gesamtklimawirkung aggregiert. Jede Klimawirkung setzt sich dabei aus den Indikatoren Klimasignal und Sensitivität zusammen, die wiederum aus mehreren Variablen bestehen können. Für die Klimasignale, Sensitivitäten und Klimawirkungen wurden Karten auf Ebene der statistischen Bezirke und der konkreten Flächen vorgelegt. Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit wurden die zukünftigen Klimawirkungen anhand der Entwicklung von Klimasignal und Sensitivität qualitativ für die Gesamtstadt beschrieben und nicht für die städtischen Teilräume aufgelöst. Diese Herangehensweise ist neu und hat den Vorteil, dass sowohl gegenwärtige als auch künftige Klimasignale auf vergleichsweise belastbaren Daten beruhen: flächeninterpolierte Messdaten des Deutschen Wetterdienstes für die Gegenwart und ensemblebasierte Trends für die Zukunft.

Die Auswertung der Klimadaten der Station Jena-Sternwarte erweiterte den bisherigen Betrachtungshorizont um gut 130 Jahre auf den Zeitraum 1824-2100 und analysiert die Entwicklung der für Klimafolgenanalysen wichtigsten Kenngrößen. Dabei konnte ein Anstieg der mittleren Jahres-, Sommer- und Winterlufttemperatur verzeichnet werden. Weiterhin ist die Anzahl der Sommer- und Heißen Tage gestiegen, die der Frost- und Eistage gesunken. Laut Klimaprojektionen werden sich diese Trends bis zum Ende des Jahrhunderts fortsetzen. Der Jahres- und Winterniederschlag hat bis zur Gegenwart leicht zugenommen, während der Sommerniederschlag unverändert blieb. Künftig wird der Sommerniederschlag leicht abnehmen, der Winterniederschlag leicht zunehmen, so dass in der Summe der Jahresniederschlag weitgehend gleichbleibt. Die jährliche klimatische Wasserbilanz hat sich seit Mitte des letzten Jahrhunderts stark verringert, was durch die Abnahme der sommerlichen klimatischen Wasserbilanz begründet ist. Die Wasserbilanz wird sich laut Klimaprojektionen im Sommerhalbjahr und im Gesamtjahr weiter verringern, bevor es ab der Klimaperiode 2051-2080 zu einer Stabilisierung kommen soll.

Für die Klimawirkung *Wärmebelastung für die Bevölkerung* diene die Anzahl Heißer Tage als Klimasignal. Hier finden sich die höchsten Werte im austauscharmen Saaletal, während auf den umliegenden Hochflächen nur etwa die Hälfte der Anzahl Heißer Tage verzeichnet wird. Für die Sensitivität wurden Subindikatoren für den städtischen Wärmeinseleffekt und die hitzesensitive Bevölkerung verwendet. Beide Subindikatoren umfassen mehr Variablen als standardmäßig üblich. Dies sind für den städtischen Wärmeinseleffekt zusätzlich der Fragmentierungsgrad und die Naturferne, für die hitzesensitive Bevölkerung kommen weitere Parameter zur sozialen Vulnerabilität hinzu. Der Subindikator der hitzesensitiven Bevölkerung ist am stärksten in Bezirken mit Großwohnsiedlungen ausgeprägt. Am anderen Ende des Ranking finden sich ländlich geprägte Bezirke. Für den Wärmeinseleffekt zeigen sich die höchsten Werte entlang der Talachse des Saaletals. Die Bezirke mit dem geringsten Wärmeinseleffekt sind die dörflich geprägten Bezirke, deren Siedlungsflächen von naturnahen Landnutzungen umgeben sind. Die Klimawirkung zeigt insgesamt baulich verdichtete Bezirke entlang der Saaletalachse an vorderer Stelle. Hier konzentrieren sich hitzesensitive Bevölkerung, Wärmeinseleffekt und Anzahl Heißer Tage. Die Bezirke mit unterdurchschnittlicher Klimawirkung finden sich im dörflich geprägten, naturnahen Umland und abseits des Hauptsiedlungskörpers. Künftig muss mit einer Zunahme der Klimawirkung gerechnet werden. Sowohl das Klimasignal als auch beide Subindikatoren der Sensitivität werden sich in einer, für die Belastungssituation, verstärkender Weise entwickeln.

Die Klimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* setzt sich aus den drei Teilklimawirkungen für Ackerflächen, Waldflächen und Stadtbäume zusammen. Die klimatische Wasserbilanz in der ackerbaulichen Vegetationsperiode bzw. forstlichen Vegetationszeit diene als Klimasignal. Die klimatische Wasserbilanz bezieht sich hier explizit auf die jeweilige Flächennutzung und die taggenaue Länge der Vegetationsperiode. Die höchsten Wasserbilanzen finden sich in den Bezirken auf der Hochfläche im Nordwesten des Stadtgebietes, die geringsten im Norden und Nordosten. Die Sensitivitäten bestanden aus dem pflanzenverfügbaren Wasser für die Ackerflächen, den Hauptbaumarten und der Feuchtestufe für Waldflächen sowie der Baumart für die Stadtbäume. berdurchschnittliche Sensitivitäten finden sich für Ackerflächen vor allem im Nordwesten und Südosten, für Waldflächen im Westen und Osten des Stadtgebietes und für die Stadtbäume heterogen über das Stadtgebiet verteilt. Die drei Teilklimawirkungen wurden zur Gesamtklimawirkung *Trockenstress für die Vegetation* zusammengeführt. Dabei weist der Norden und Nordosten des Stadtgebietes eine überdurchschnittlich hohe Gesamtklimawirkung auf, die aus der Kombination von hohem Trockenstress auf

Acker- und Waldflächen entsteht. Der Nordwesten ist vor allem infolge einer vergleichsweise guten klimatischen Wasserbilanz einer unterdurchschnittlichen Gesamtklimawirkung ausgesetzt. Auch hier werden sich künftig die Teilklimawirkungen sowie die Gesamtklimawirkung verstärken. Ursache der Veränderung wird die, infolge höherer sommerlicher Temperaturen, geringere klimatische Wasserbilanz sein, während die Sensitivitäten für Acker- und Waldflächen konstant bleiben.

Die Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen* wurde mit Hilfe eines kombinierten Ansatzes aus Wirkmodell und Indikatorenansatz bearbeitet. Der Arbeitsaufwand ist durch die Nutzung eines Wirkmodells höher, jedoch unvermeidbar, wenn Überschwemmungen realitätsnah abgebildet werden sollen. Als Klimasignal diente das sommerliche Sturzflutpotenzial, welches eine sehr heterogene Verteilung im Stadtgebiet aufweist. Obwohl es sich beim Sturzflutpotenzial, infolge des kurzen Datenzeitraums 2004-2010, nicht um „echte Klimadaten“ handelt, wurde der Datensatz aufgrund der guten thematischen Eignung verwendet. Die Sensitivität wird durch die flächenmäßige Ausdehnung der Überschwemmung und die durchschnittliche Überflutungshöhe in einem statistischen Bezirk charakterisiert und wurde durch ein Wirkmodell im GIS ermittelt. Das verwendete Modell *r.sim.water* wurde hier erstmalig auf ein größeres Stadtgebiet angewendet. Die höchsten Werte der Sensitivität werden in den stark versiegelten Bezirken entlang der Saaletalachse verzeichnet, während ländlich geprägte, wenig versiegelte Bezirke meist eine unterdurchschnittliche Sensitivität zeigen. Eine stark überdurchschnittliche Klimawirkung tritt im Zentrum und im Süden Jenas auf, während sich Bezirke mit unterdurchschnittlicher Klimawirkung heterogen über das Stadtgebiet verteilen. Die zur Validierung der Ergebnisse herangezogenen Feuerwehreinsatzdaten zu Starkregenereignissen zeigen eine geringe bis mittlere Übereinstimmung mit der ermittelten Klimawirkung. Die Analyse der künftigen Entwicklung legt eine Verstärkung der Klimawirkung nahe. Einerseits weisen Projektionen zum Klimasignal auf eine leichte Zunahme und Intensivierung von Starkregenereignissen hin. Andererseits wird der anhaltende Trend zur Flächenversiegelung den oberflächlichen Abfluss von Regenwasser begünstigen.

Die einzelnen Klimawirkungen wurden zum Indikator der Gesamtklimawirkung aggregiert und dabei die im jeweiligen Bezirk vorkommenden Klimawirkungen und deren Stärke, sowie nicht vorhandene Klimawirkungen im Sinne eines Vorteils, berücksichtigt. Dieser Indikator kann erweitert werden, sollten später Ergebnisse zu weiteren Klimawirkungen vorliegen. Eine überdurchschnittliche Gesamtklimawirkung tritt hauptsächlich in den städtisch verdichteten Bezirken auf. In Kontrast dazu stehen ländlich geprägte Bezirke, die eine unterdurchschnittli-

che Gesamtklimawirkung zeigen. Für alle untersuchten Klimawirkungen ergab die qualitative Trendanalyse, dass eine Zunahme bzw. Verstärkung künftig wahrscheinlich ist. Damit ist eine Verstärkung der Gesamtklimawirkung künftig ebenso wahrscheinlich. Da eine, für die statistischen Bezirke, räumlich aufgelöste Darstellung aufgrund Datenmangels gegenwärtig nicht möglich ist, kann vorerst pragmatisch davon ausgegangen werden, dass die räumlichen Verteilungsmuster der Gesamtklimawirkung, ebenso wie die der einzelnen Klimawirkungen, auch künftig erhalten bleiben, jedoch die Stärke der Klimawirkung zunehmen wird. Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass die Herausforderungen, die aus diesen Klimawirkungen erwachsen, nicht neuartig sind, sondern sich aus Veränderungen der Intensität und Häufigkeit bekannter, bereits heute bestehender, Problemlagen ergeben.

Für die untersuchten Klimawirkungen wurden Planungshinweise abgeleitet und in einer *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* dargestellt. Die Klimawirkungen wurden dafür mit den gleichen Methoden auf Ebene der konkreten Flächen bearbeitet. Für die Verortung von Handlungsempfehlungen wurden Flächen mit einer statistisch überdurchschnittlichen Klimawirkung in der Gegenwart (1981-2010) priorisiert. Neben den eigentlichen Klimawirkungen wurden relevante Zusatzinformationen in die Karte integriert, die im Zusammenhang mit den Klimawirkungen Bedeutung besitzen. Für die Klimawirkungen wurden kontextspezifische Zielstellungen definiert und Handlungsempfehlungen vorgelegt. Die Planungshinweiskarte wurde im Maßstab 1:15.000 des Flächennutzungsplans der Stadt Jena angelegt und enthält für etwa ein Viertel des Stadtgebietes Handlungsempfehlungen zur Klimaanpassung. Empfehlungen zur *Wärmebelastung für die Bevölkerung* betreffen vor allem die verdichteten Stadtbereiche in der Tallage. Anpassungsmaßnahmen zum *Trockenstress für die Vegetation* empfehlen sich für Waldflächen vor allem im Norden, Nordosten und Westen der Stadt und für Ackerflächen ebenso im Norden und Nordosten. Die Handlungsempfehlungen für Stadtbäume sollten im gesamten Stadtgebiet realisiert werden. Handlungsoptionen für *Überschwemmungen durch Starkregen* sollten im Zentrum und im Süden Jenas umgesetzt werden. Es zeigt sich, dass viele städtische Bereiche existieren, in denen sich mehrere Klimawirkungen räumlich überlagern. Diese Flächen finden sich insbesondere in verdichteten Stadtbereichen wie dem Stadtzentrum Jenas. Hier sollten Anpassungsmaßnahmen vordringlich umgesetzt werden, vor allem multifunktionale Maßnahmen, die mehrere Klimawirkungen adressieren. Die *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* stellt in diesem Sinne einen wichtigen Beitrag zur besseren Berücksichtigung von Auswirkungen des Klimawandels in der Stadtplanung dar.

Das in der Arbeit vorgestellte methodische Konzept stellt einen konsistenten Ansatz dar, um Klimawirkungen auf städtischer Ebene zu bestimmen und Planungshinweise abzuleiten. Die Arbeit greift aktuelle Praxisansätze auf, erweitert sie um den aktuellen Forschungsstand und bereitet die Methodik für die Anwendung durch kommunale Akteure auf. Eine konsequente Anwendung des konzeptionellen Rahmens bringt zugleich Probleme in Bezug auf die Datenverfügbarkeit für künftige Betrachtungshorizonte mit sich. Der Ansatz basiert auf der Anwendung von gebräuchlichen GIS-Werkzeugen, ist modular aufgebaut und kann somit um neue Klimawirkungen erweitert werden. Die verwendeten Methoden können mit geringem Aufwand auf andere urbane Räume übertragen werden. Für drei urbane Klimawirkungen wurde ein beispielhafter methodischer Bearbeitungsablauf aufgezeigt. Die Qualität der Ergebnisse hängt von den verfügbaren Eingangsdaten ab. Die verwendeten frei zugänglichen Klima- und Fachdaten eignen sich für kommunale Klimawirkungsanalysen auf räumlicher Ebene von größeren Ortsteilen und statistischen Bezirken, während für Detailanalysen und die Verortung von Anpassungsmaßnahmen auf Ebene konkreter Flächen räumlich höher aufgelöste Daten empfohlen werden. Beides gilt für die Analyse der gegenwärtigen Klimawirkungen, während für die Untersuchung zukünftiger Klimawirkungen weder Klima- noch Sensitivitätsdaten räumlich hoch genug aufgelöst und belastbar vorliegen, so dass die qualitative Auswertung von Klimamodell-Ensembles und demographischen und sozio-ökonomischen Szenarien auf gesamtstädtischer Ebene fachlich valider und für die Zielgruppe besser geeignet ist.

Bei der Beschäftigung mit den Themen Klimawirkungsanalyse und Planungshinweiskarte ergaben sich methodische Fragestellungen, die im begrenzten Rahmen der Erstellung der Arbeit nicht beantwortet werden konnten und die, allgemein und nicht nur für Jena, Raum für weitere Forschungsaktivitäten bieten. Diskussionsbedarf besteht z. B. bei der Frage, ob für die Beschreibung der Sensitivitäten relative oder absolute Werte zielführender sind oder ob nicht ein Mix aus beiden, wie BUTH et al. (2015) es praktizieren, die geeignetere Wahl ist. Wichtiger noch ist die Schaffung von standardisierten Indikatoren zur Beschreibung von Klimawirkungen und Vulnerabilitäten sowie von allgemeingültigen Bewertungsmaßstäben für diese Indikatoren. Somit wären Bewertungen nicht nur relativ auf das Untersuchungsgebiet möglich, sondern z. B. deutschlandweit vergleichbar. Für die Operationalisierung künftiger Klimawirkungen sind Szenarien zur Entwicklung der Sensitivitäten unabdingbar, da Klimaszenarien allein nicht zur Beschreibung der Klimawirkung ausreichen. Bisher existieren lediglich Prognosen für die Entwicklung in den nächsten Jahren bis hin zu wenigen Dekaden, z. B. der Bevölkerung und der Landnutzung. Die ermittelten Ergebnisse für die Klimawirkungen be-

dürfen einer Validierung und Sensitivitätsanalyse. Während die Validierung anhand etablierter Wirkmodelle und „realer Felddaten“ durchzuführen wäre, würde die Sensitivitätsanalyse die gleichen, hier verwendeten, Methoden nutzen, jedoch mittels Verwendung räumlich hoch aufgelöster Eingangsdaten die Unterschiede in der Ergebnisqualität quantifizieren. Für die Darstellung von Planungshinweisen in entsprechenden Planungshinweiskarten wäre die Erarbeitung umfangreicher Darstellungsvorschriften, wie sie für stadtklimatische Fragestellungen von der VDI-KRL (2008) aufgezeigt werden, zielführend.

Offene Fragen mit lokalem Bezug betreffen z. B. die heterogene Verteilung des Sturzflutpotenzials bei der Klimawirkung *Überschwemmungen durch Starkregen*. Ist das Verteilungsmuster durch den kurzen Betrachtungszeitraum 2004-2010 begründet oder fällt die Verteilung der Starkniederschlagszellen tatsächlich so kleinräumig unterschiedlich aus? Hinsichtlich der Beurteilung der lokalen Wärmeinselintensität wäre ebenso interessant zu wissen, seit welchem Zeitpunkt sich die Klimastation Jena-Sternwarte unter stadtklimatischen Einfluss befindet, welcher Anteil der Temperaturerhöhung auf, im Zuge der Urbanisierung sich verstärkende, Stadtklimaeffekte zurückzuführen ist und welcher Anteil durch großräumige anthropogene Klimaveränderungen verursacht wurde.



## Literaturverzeichnis

- ADELEKAN, I. O. (2012): Vulnerability to wind hazards in the traditional city of Ibadan, Nigeria. In: *Environment and Urbanization* 24 (2): 597–617. DOI: 10.1177/0956247812454247.
- AG BODEN (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Unter Mitarbeit von H. Sponagel, W. Grotenthaler, K. J. Hartmann, R. Hartwich, P. Janetzko, H. Joisten et al. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart.
- AG BODEN (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2010): Verknüpfungsregel 3.31: Ermittlung der effektiven Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode (Mai – August).
- AHERN, M., R. S. KOVATS, P. WILKINSON, R. FEW & F. MATTHIES (2005): Global Health Impacts of Floods: Epidemiologic Evidence. In: *Epidemiologic Reviews* 27 (1): 36–46. DOI: 10.1093/epirev/mxi004.
- AK-SK (Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung) (2003): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 6. Aufl. Eching bei München: IHW-Verl.
- ALAM, M. & M. G. RABBANI (2007): Vulnerabilities and responses to climate change for Dhaka. In: *Environment and Urbanization* 19 (1): 81–97. DOI: 10.1177/0956247807076911.
- ALDERMAN, K., L. R. TURNER & S. TONG (2012): Floods and human health: A systematic review. In: *Environment international* 47: 37–47. DOI: 10.1016/j.envint.2012.06.003.
- ALEXANDER, L. V., X. ZHANG, T. C. PETERSON, J. CAESAR, B. GLEASON, A. M. G. KLEIN TANK, M. HAYLOCK, D. COLLINS, B. TREWIN, F. RAHIMZADEH, A. TAGIPOUR, K. RUPA KUMAR, J. REVADEKAR, G. GRIFFITHS, L. VINCENT, D. B. STEPHENSON, J. BURN, E. AGUILAR, M. BRUNET, M. TAYLOR, M. NEW, P. ZHAI, M. RUSTICUCCI & J. L. VAZQUEZ-AGUIRRE (2006): Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111 (D5). DOI: 10.1029/2005JD006290.
- ALI-TOUDERT, F. & H. MAYER (2006): Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. In: *Building and Environment* 41 (2): 94–108. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.01.013.
- ALLE, M., B. TYRNA & B. HALLER (2011): Fernerkundungsbasierte Modellierung von Überflutungsszenarien nach Starkregenereignissen als Grundlage zur Risikoabschätzung. Conference Paper. DWA-Tagung GIS & GDI in der Wasserwirtschaft.
- ALLEN, C. D., A. K. MACALADY, H. CHENCHOUNI, D. BACHELET, N. MCDOWELL, M. VENNETIER, T. KITZBERGER, A. RIGLING, D. D. BRESHEARS, E. H. HOGG, P. GONZALEZ, R. FENSHAM, Z. ZHANG, J. CASTRO, N. DEMIDOVA, J.-H. LIM, G. ALLARD, S. W. RUNNING, A. SEMERCI & N. COBB (2010): A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. In: *Forest Ecology and Management* 259 (4): 660–684. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.001.
- AMB (Ambimet) (2000): Simulation der regionalen und bodennahen lokalen Kaltluftabflüsse und Massenströme in Thüringen auf der Grundlage der TK 25. Projektbericht; Projektzeitraum September 2000 - November 2000. Gauting.
- AMTHOR, J. S. (2001): Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO<sub>2</sub> concentration. In: *Field Crops Research* 73 (1): 1–34. DOI: 10.1016/S0378-4290(01)00179-4.
- ANDEREGG, W. R. L., L. PLAVCOVÁ, L. D. L. ANDEREGG, U. G. HACKE, J. A. BERRY & C. B. FIELD (2013): Drought's legacy: multiyear hydraulic deterioration underlies widespread aspen forest die-off and portends increased future risk. In: *Global Change Biology* 19 (4): 1188–1196. DOI: 10.1111/gcb.12100.
- ANDERSON, G. B. & M. L. BELL (2011): Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities. In: *Environmental health perspectives* 119 (2): 210–218. DOI: 10.1289/ehp.1002313.
- ARMENAKIS, C. & N. NIRUPAMA (2014): Flood Risk Mapping for the City of Toronto. In: *Procedia Economics and Finance* 18: 320–326. DOI: 10.1016/S2212-5671(14)00946-0.

- ARNFIELD, A. J. (2003): Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. In: *International Journal of Climatology* 23 (1): 1–26. DOI: 10.1002/joc.859.
- ASSAL, T. J., P. J. ANDERSON & J. SIBOLD (2016): Spatial and temporal trends of drought effects in a heterogeneous semi-arid forest ecosystem. In: *Forest Ecology and Management* 365: 137–151. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.01.017.
- ASSMANN, A., K. FRITSCH & (St. Jäger) (2012): Starkregengefahrenkarten und Risikomanagement im Glems-Einzugsgebiet. In: STROBL, J., T. BLASCHKE & G. GRIESEBNER (HG.): Angewandte Geoinformatik 2012. Beiträge zum 24. AGIT-Symposium Salzburg. Berlin: Wichmann: 576–585.
- ÅSTRÖM, D. O., B. FORSBERG, K. L. EBI & J. ROCKLÖV (2013): Attributing mortality from extreme temperatures to climate change in Stockholm, Sweden. In: *Nature Climate Change* 3 (12): 1050–1054. DOI: 10.1038/nclimate2022.
- ÅSTRÖM, D. O., B. FORSBERG & J. ROCKLÖV (2011): Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: a review of recent studies. In: *Maturitas* 69 (2): 99–105. DOI: 10.1016/j.maturitas.2011.03.008.
- AUBRECHT, C. & D. ÖZCEYLAN (2013): Identification of heat risk patterns in the U.S. National Capital Region by integrating heat stress and related vulnerability. In: *Environment international* 56: 65–77. DOI: 10.1016/j.envint.2013.03.005.
- BABEL, M. S., A. DAS GUPTA & N. D. S. DOMINGO (2006): Land Subsidence: A Consequence of Groundwater Over-Exploitation in Bangkok, Thailand. In: *International Review for Environmental Strategies (IRES) Volume 6, Number 2*.
- BAGUSKAS, S. A., S. H. PETERSON, B. BOOKHAGEN & C. J. STILL (2014): Evaluating spatial patterns of drought-induced tree mortality in a coastal California pine forest. In: *Forest Ecology and Management* 315: 43–53. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.12.020.
- BALCHIN, W. & N. PYE (1947): A micro-climatological investigation of Bath and the surrounding district. In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 73 (317–318): 297–323. DOI: 10.1002/qj.49707331706.
- BARBER, V. A., G. P. JUDAY & B. P. FINNEY (2000): Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. In: *Nature* 405 (6787): 668–673. DOI: 10.1038/35015049.
- BARRIOPEDRO, D., E. M. FISCHER, J. LUTERBACHER, R. M. TRIGO & R. GARCÍA-HERRERA (2011): The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. In: *Science (New York, N.Y.)* 332 (6026): 220–224. DOI: 10.1126/science.1201224.
- BARTHOLY, J. & R. PONGRÁCZ (2007): Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. In: *Extreme Climatic Events* 57 (1–2): 83–95. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.002.
- BARTLETT, S. (2008): Climate change and urban children. Impacts and implications for adaptation in low - and middle-income countries. London: International Institute for Environment and Development (Human settlements discussion paper series. Climate change and cities, 2).
- BASSUK, N., D. F. CURTIS, B. Z. MARRANCA & B. NEAL (2009): Recommended Urban Trees: Site Assessment and Tree Selection for Stress Tolerance. Hg. v. Urban Horticulture Institute. Cornell University. Ithaca, NY.
- BASU, R. & J. M. SAMET (2002): Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality: A Review of the Epidemiologic Evidence. In: *Epidemiologic Reviews* 24 (2): 190–202. DOI: 10.1093/epirev/mxf007.
- BAUMÜLLER, J. (2015): A summary of key methodologies. In: NG, E. & C. REN (HG.): The urban climatic map. A methodology for sustainable urban planning: 35–44.
- BAUMÜLLER, J. & N. BAUMÜLLER (2011): Urban Climate as a Factor for Climate Change Adaptation in City Planning. Session: Urban Climate. European Meteorological Society. Berlin, 13.09.2011.
- BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung) (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte. Ergebnisbericht der fallstudiengestützten Expertise "Klimaanpassungsstrategien zur Überflutungsvorsorge verschiedener Siedlungstypen als kommunale Gemeinschaftsaufgabe". Stand April 2015. Bonn: BBSR im BBR.

- BECK, C. (2007): Regional- und lokalklimatische Besonderheiten. In: GEBHARDT, H., R. GLASER, U. RADTKE & P. REUBER (HG.): Geographie. Physische Geographie und Humangeographie. 1. Aufl. München: Elsevier, Spektrum, Akad. Verl.: 229–233.
- BECK, P. S. A., G. P. JUDAY, C. ALIX, V. A. BARBER, S. E. WINSLOW, E. E. SOUSA, P. HEISER, J. D. HERRIGES & S. J. GOETZ (2011): Changes in forest productivity across Alaska consistent with biome shift. In: *Ecology letters* 14 (4): 373–379. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01598.x.
- BÉGUIN, A., S. HALES, J. ROCKLÖV, C. ÅSTRÖM, V. R. LOUIS & R. SAUERBORN (2011): The opposing effects of climate change and socio-economic development on the global distribution of malaria. In: *Global Environmental Change* 21 (4): 1209–1214. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.06.001.
- BEHRENS, U. & A. GRÄTZ (2009): Stadtplanung und Klimawandel - Eine Kooperation mit der Stadtentwicklungsverwaltung von Berlin. In: DWD (Deutscher Wetterdienst) (Hg.): Klimastatusbericht 2008. Offenbach: DWD (Klimastatusbericht : 2008): 24–31.
- BENISTON, M., D. B. STEPHENSON, O. B. CHRISTENSEN, C. A. T. FERRO, C. FREI, S. GOYETTE, K. HALSNAES, T. HOLT, K. JYLHÄ, B. KOFFI, J. PALUTIKOF, R. SCHÖLL, T. SEMMLER & K. WOTH (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. In: *Climatic Change* 81 (1): 71–95. DOI: 10.1007/s10584-006-9226-z.
- BENNETT, C. M., K. B. G. DEAR & A. J. MCMICHAEL (2014): Shifts in the seasonal distribution of deaths in Australia, 1968–2007. In: *International journal of biometeorology* 58 (5): 835–842. DOI: 10.1007/s00484-013-0663-x.
- BINDI, M. & J. E. OLESEN (2011): The responses of agriculture in Europe to climate change. In: *Regional Environmental Change* 11 (1): 151–158. DOI: 10.1007/s10113-010-0173-x.
- BIRKMANN, J. (2006): Measuring vulnerability to natural hazards. Towards disaster resilient societies. Tokyo, New York: United Nations University.
- BIRKMANN, J., S. L. CUTTER, D. S. ROTHMAN, T. WELLE, M. GARSCHAGEN, B. J. VAN RUIJVEN, B. O'NEILL, B. L. PRESTON, S. KIENBERGER, O. D. CARDONA, T. SIAGIAN, D. HIDAYATI, N. SETIADI, C. R. BINDER, B. HUGHES & R. PULWARTY (2013): Scenarios for vulnerability: opportunities and constraints in the context of climate change and disaster risk. In: *Climatic Change* 133 (1): 53–68. DOI: 10.1007/s10584-013-0913-2.
- BLANCO, H., M. ALBERTI, A. FORSYTH, K. J. KRIZEK, D. A. RODRÍGUEZ, E. TALEN & C. ELLIS (2009): Hot, congested, crowded and diverse: Emerging research agendas in planning. In: *Hot, congested, crowded and diverse: Emerging research agendas in planning* 71 (4): 153–205. DOI: 10.1016/j.progress.2009.03.001.
- BLĄŻEJCZYK, K., Y. EPSTEIN, G. JENDRITZKY, H. STAIGER & B. TINZ (2012): Comparison of UTCI to selected thermal indices. In: *International journal of biometeorology* 56 (3): 515–535. DOI: 10.1007/s00484-011-0453-2.
- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung) (Hg.) (2011): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Ursachen und Folgen des Klimawandels durch urbane Konzepte begegnen. Bonn (Forschungen, 149).
- BOBERG, F., P. BERG, P. THEJLL, W. GUTOWSKI & J. H. CHRISTENSEN (2009a): Improved confidence in climate change projections of precipitation further evaluated using daily statistics from ENSEMBLES models. In: *Climate Dynamics* 35: 1509–1520. DOI: 10.1007/s00382-009-0683-8.
- BOBERG, F., P. BERG, P. THEJLL, W. J. GUTOWSKI & J. H. CHRISTENSEN (2009b): Improved confidence in climate change projections of precipitation evaluated using daily statistics from the PRUDENCE ensemble. In: *Climate Dynamics* 32 (7-8): 1097–1106. DOI: 10.1007/s00382-008-0446-y.
- BÖER, W. & G. SCHMIDT (1976): Klimagebiete und bioklimatische Situation der Sanatorien, Kur- und Erholungsorte. In: (Hermann-Haack-Verlag) (Hg.): Atlas der Deutschen Demokratischen Republik, Blatt 9. Gotha, Leipzig.
- BÖHM, H. R., T. KEMPER & R. RIECHEL (2011): Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Handlungskonzept für das Gersprenz-Einzugsgebiet. Analysen und Empfehlungen für den KLARA-Net Pilotraum. Hg. v. KLARA-Net. Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR. Darmstadt.
- BOLTE, A., P. IBISCH, A. MENZEL & A. ROTHE (2008): Was Klimahüllen uns verschweigen. In: *AFZ - Der Wald* (15): 800–803.

- BONAZZA, A., P. MESSINA, C. SABBIONI, C. M. GROSSI & P. BRIMBLECOMBE (2009): Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe. In: *Science of The Total Environment* 407 (6): 2039–2050. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.10.067.
- BRADLEY, B. A., D. M. BLUMENTHAL, D. S. WILCOVE & L. H. ZISKA (2010): Predicting plant invasions in an era of global change. In: *Trends in Ecology & Evolution* 25 (5): 310–318. DOI: 10.1016/j.tree.2009.12.003.
- BRANDL, H., J. WELSCH, M. FALTERMAIER, C. HERMENAUE, G. SCHUMANN, H. STOCK, T. TONNDORF, M. REHFELD-KLEIN, S. HEILAND, C. WILKE, K. RITTEL, C. H. V. BITTELFELD, B. HOLZ, A. NEISEN, K. THURAU, P. TRUTE & D. HERRMANN (2011): Stadtentwicklungsplan Klima. Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern. Hg. v. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung. Berlin.
- BRENDEL, C., E. BRISSON, F. HEYNER, E. WEIGL & B. AHRENS (2014): Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen. Offenbach am Main: Selbstverl. des Deutschen Wetterdienstes (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 244).
- BRUSE, M. & H. FLEER (1998): Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. In: *Environmental Modelling & Software* 13 (3-4): 373–384. DOI: 10.1016/S1364-8152(98)00042-5.
- BUCHNER, W., C. BERENDONK, P. HEIMBERG, A. HENTSCHEL, J. HOLZ, B. LAUBROCK, H. LOPOTZ, J. MATTHIAS, M. PRIES, G. STALLJOHANN & N. UPPENKAMP (2012): Klimawandel und Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Hg. v. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Münster.
- BUTH, M., W. KAHLENBORN, J. SAVELSBERG, (Nina Becker), S. GREIVING, M. FLEISCHHAUER, C. LINDNER, M. ZEBISCH & S. SCHNEIDERBAUER (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Climate Change, 24/2015).
- CÁCERES, M. D., J. MARTÍNEZ-VILALTA, L. COLL, P. LLORENS, P. CASALS, R. POYATOS, J. G. PAUSAS & L. BROTONS (2015): Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 213: 77–90. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.06.012.
- CARTER, J. G., G. CAVAN, A. CONNELLY, S. GUY, J. HANDLEY & A. KAZMIERCZAK (2015): Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation. In: *Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation* 95: 1–66. DOI: 10.1016/j.progress.2013.08.001.
- CARVALHO, A., A. MONTEIRO, M. FLANNIGAN, S. SOLMAN, A. I. MIRANDA & C. BORREGO (2011): Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality. In: *Atmospheric Environment* 45 (31): 5545–5553. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.05.010.
- CASADIO-TARABUSI, E. & G. GUARINI (2013): An Unbalance Adjustment Method for Development Indicators. In: *Social Indicators Research* 112 (1): 19–45. DOI: 10.1007/s11205-012-0070-4.
- CASADIO-TARABUSI, E. & P. PALAZZI (2004): An index for sustainable development. In: *BNL Quarterly Review*.
- CASTRO, D., T. EINFALT, (St. Frerichs), K. FRIEDEHEIM, (Hatzfeld, F.: Kubik, A.), R. MITTELSTÄDT, M. MÜLLER, J. SELTMANN & A. WAGNER (2008a): Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Ergebnisse des Forschungsvorhabens. Abschnitt A: Datenbank. Förderprogramm des BMBF: Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RIMAX). Aachen, Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb09/599644559.pdf>.
- CASTRO, D., T. EINFALT, (St. Frerichs), K. FRIEDEHEIM, (Hatzfeld, F.: Kubik, A.), R. MITTELSTÄDT, M. MÜLLER, J. SELTMANN & A. WAGNER (2008b): Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Ergebnisse des Forschungsvorhabens. Abschnitt C: Maßnahmen. Förderprogramm des BMBF: Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse (RIMAX). Aachen, Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb09/599644559.pdf>.
- CATTIVELLI, L., F. RIZZA, F.-W. BADECK, E. MAZZUCOTELLI, A. M. MASTRANGELO, E. FRANCIA, C. MARÈ, A. TONDELLI & A. M. STANCA (2008): Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. In: *Field Crops Research* 105 (1–2): 1–14. DOI: 10.1016/j.fcr.2007.07.004.
- CHANDLER, T. J. (1965): The climate of London. London.
- CHEN, X.-L., H.-M. ZHAO, P.-X. LI & Z.-Y. YIN (2006): Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. In: *Remote Sensing of Environment* 104 (2): 133–146. DOI: 10.1016/j.rse.2005.11.016.

- CHENG, C.-H., S.-F. HUANG & H.-J. TEOH (2011): Predicting daily ozone concentration maxima using fuzzy time series based on a two-stage linguistic partition method. In: *Computers & Mathematics with Applications* 62 (4): 2016–2028. DOI: 10.1016/j.camwa.2011.06.044.
- CHMIELEWSKI, F. M., A. MÜLLER & W. KÜCHLER (2005): Possible impacts of climate change on natural vegetation in Saxony (Germany). In: *International journal of biometeorology* 50 (2): 96–104. DOI: 10.1007/s00484-005-0275-1.
- CHMIELEWSKI, F. M. & T. RÖTZER (2002): Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. In: *Climate Research* 19: 257–264. DOI: 10.3354/cr019257.
- CHMIELEWSKI, F.-M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In: ENDLICHER, W. (HG.): *Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*. Potsdam: Potsdam-Inst. für Klimafolgenforschung: 75–85.
- CHMIELEWSKI, F.-M. (2013): Phenology in agriculture and horticulture. In: SCHWARTZ, M. D. (HG.): *Phenology. An integrative environmental science*. 2. ed. Dordrecht: Springer: 539–561.
- CHMIELEWSKI, F.-M. & W. KÖHN (2000): Impact of weather on yield components of winter rye over 30 years. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 102 (4): 253–261. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00125-8.
- CHMIELEWSKI, F.-M., A. MÜLLER & E. BRUNS (2004): Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 121 (1-2): 69–78. DOI: 10.1016/S0168-1923(03)00161-8.
- CHMURA, D. J., P. D. ANDERSON, G. T. HOWE, C. A. HARRINGTON, J. E. HALOFSKY, D. L. PETERSON, D. C. SHAW & J. BRAD ST. CLAIR (2011): Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. In: *Forest Ecology and Management* 261 (7): 1121–1142. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.12.040.
- CHOAT, B., S. JANSEN, T. J. BRODRIBB, H. COCHARD, S. DELZON, R. BHASKAR, S. J. BUCCI, T. S. FEILD, S. M. GLEASON, U. G. HACKE, A. L. JACOBSEN, F. LENS, H. MAHERALI, J. MARTÍNEZ-VILALTA, S. MAYR, M. MENCUCCINI, P. J. MITCHELL, A. NARDINI, J. PITTERMANN, R. B. PRATT, J. S. SPERRY, M. WESTOBY, I. J. WRIGHT & A. E. ZANNE (2012): Global convergence in the vulnerability of forests to drought. In: *Nature* 491 (7426): 752–755. DOI: 10.1038/nature11688.
- CHOW, W. T., W.-C. CHUANG & P. GOBER (2012): Vulnerability to Extreme Heat in Metropolitan Phoenix: Spatial, Temporal, and Demographic Dimensions. In: *The Professional Geographer* 64 (2): 286–302. DOI: 10.1080/00330124.2011.600225.
- CHRISTENSEN, J. H. & O. B. CHRISTENSEN (2003): Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe. In: *Nature* 421 (6925): 805–806. DOI: 10.1038/421805a.
- CIAIS, P., M. REICHSTEIN, N. VIOVY, A. GRANIER, J. OGÉE, V. ALLARD, M. AUBINET, N. BUCHMANN, C. BERNHOFER, A. CARRARA, F. CHEVALLIER, N. D. NOBLET, A. D. FRIEND, P. FRIEDLINGSTEIN, T. GRÜNWALD, B. HEINESCH, P. KERONEN, A. KNOHL, G. KRINNER, D. LOUSTAU, G. MANCA, G. MATTEUCCI, F. MIGLIETTA, J. M. OURCIVAL, D. PAPALE, K. PILEGAARD, S. RAMBAL, G. SEUFERT, J. F. SOUSSANA, M. J. SANZ, E. D. SCHULZE, T. VESALA & R. VALENTINI (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. In: *Nature* 437 (7058): 529–533. DOI: 10.1038/nature03972.
- CISCAR, J.-C., A. IGLESIAS, L. FEYEN, L. SZABÓ, D. VAN REGEMORTER, B. AMELUNG, R. NICHOLLS, P. WATKISS, O. B. CHRISTENSEN, R. DANKERS, L. GARROTE, C. M. GOODESS, A. HUNT, A. MORENO, J. RICHARDS & A. SORIA (2011): Physical and economic consequences of climate change in Europe. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (7): 2678–2683. DOI: 10.1073/pnas.1011612108.
- CLELAND, E. E., I. CHUINE, A. MENZEL, H. A. MOONEY & M. D. SCHWARTZ (2007): Shifting plant phenology in response to global change. In: *Trends in Ecology & Evolution* 22 (7): 357–365. DOI: 10.1016/j.tree.2007.04.003.
- CUTTER, S. L. (1996): Vulnerability to environmental hazards. In: *Progress in Human Geography* 20 (4): 529–539. DOI: 10.1177/030913259602000407.
- CUTTER, S. L., K. D. ASH & C. T. EMRICH (2014): The geographies of community disaster resilience. In: *Global Environmental Change* 29: 65–77. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005.
- CUTTER, S. L., B. J. BORUFF & W. L. SHIRLEY (2003): Social Vulnerability to Environmental Hazards. In: *Social Science Quarterly* 84 (2): 242–261. DOI: 10.1111/1540-6237.8402002.

- CUTTER, S. L., C. G. BURTON & C. T. EMRICH (2010): Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. In: *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 7 (1). DOI: 10.2202/1547-7355.1732.
- CUTTER, S. L., J. T. MITCHELL & M. S. SCOTT (2000): Revealing the Vulnerability of People and Places: A Case Study of Georgetown County, South Carolina. In: *Annals of the Association of American Geographers* 90 (4): 713–737. DOI: 10.1111/0004-5608.00219.
- DAMATTA, F. M., A. GRANDIS, B. C. ARENQUE & M. S. BUCKERIDGE (2010): Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. In: *Climate Change and Food Science* 43 (7): 1814–1823. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.11.001.
- DASGUPTA, S., B. LAPLANTE, S. MURRAY & D. WHEELER (2009): Climate Change and the Future Impacts of Storm-Surge Disasters in Developing Countries. CGD Working Paper 182. Hg. v. Center for Global Development (CGD). Washington, D.C.
- DESA (United Nations, Departement of Economical and Social Affairs, Population Division) (2014): World urbanization prospects. The 2014 revision, highlights. New York: United Nations.
- DIAGNE, K. (2007): Governance and natural disasters. Addressing flooding in Saint Louis, Senegal. In: *Environment and Urbanization* 19 (2): 552–562. DOI: 10.1177/0956247807082836.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (1994): Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Berlin: Beuth.
- DOBNEY, K., C. J. BAKER, A. D. QUINN & L. CHAPMAN (2009): Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom. In: *Meteorological Applications* 16 (2): 245–251. DOI: 10.1002/met.114.
- DONALDSON, G. C., R. S. KOVATS, W. R. KEATINGE & A. J. MCMICHAEL (2001): Heat- and cold related mortality and morbidity and climate change. In: MAYNARD, R. L. (HG.): Health effects of climate change in the UK: 70–80.
- DÖRFER, S. (2004): Stadtklimatische Untersuchungen im Raum Jena. Diplomarbeit. Jena.
- DRASTIG, K., A. PROCHNOW, M. BAUMECKER, W. BERG & R. BRUNSCH (2011): Agricultural Water Management in Brandenburg. In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 142 (1-2): 119–140.
- DST (Deutscher Städtetag) (2015): Starkregen und Sturzfluten in Städten. Eine Arbeitshilfe. Unter Mitarbeit von V. Völker, M. Illgen und K. Rocks. Hg. v. Deutscher Städtetag (DST). Berlin, Köln.
- DU, W., G. J. FITZGERALD, M. CLARK & X.-Y. HOU (2010): Health Impacts of Floods. In: *Prehospital and Disaster Medicine* 25 (03): 265–272. DOI: 10.1017/S1049023X00008141.
- DURÃO, R. M., M. J. PEREIRA, A. C. COSTA, J. DELGADO, G. DEL BARRIO & A. SOARES (2010): Spatial-temporal dynamics of precipitation extremes in southern Portugal: a geostatistical assessment study. In: *International Journal of Climatology* 30 (10): 1526–1537. DOI: 10.1002/joc.1999.
- DURY, M., A. HAMBUCKERS, P. WARNANT, A. HENROT, E. FAVRE, M. OUBERDOUS & L. FRANÇOIS (2011): Responses of European forest ecosystems to 21st century climate: assessing changes in interannual variability and fire intensity. In: *iForest - Biogeosciences and Forestry* 4 (2): 82. DOI: 10.3832/for0572-004.
- DÜTEMEYER, D., A. B. BARLAG, W. KUTTLER & U. AXT-KITTNER (2013): Measures against heat stress in the city of Gelsenkirchen, Germany. In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 144 (3-4): 181–201.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Hamburg: Parey (DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, 113).
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (1991): Beitrag zur Bestimmung des effektiven Niederschlags für Bemessungshochwasser aus Gebietskenngrößen. Ergebnis einer vergleichenden Untersuchung durch den Fachausschuß "Niederschlag-Abfluß-Modelle". Hamburg: Parey (DVWK-Materialien, 2).
- DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) (2013): Starkregen und urbane Sturzfluten. Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge. Hennef (Sieg): Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Themen, 1/2013).

- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2016a): Übersicht zu Informationen und Produkten für Fachnutzer: Land- und Forstwirtschaft. Offenbach. Online verfügbar unter [http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/uebersicht\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/uebersicht_node.html), zuletzt geprüft am 18.05.2016.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2016b): Wetterlexikon. Hg. v. Deutscher Wetterdienst (DWD). Offenbach am Main. Online verfügbar unter [http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon\\_node.html](http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html), zuletzt geprüft am 14.04.2016.
- EEA (European Environment Agency) (2012): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union (EEA Report, 12/2012).
- ÉGERHÁZI, L., N. KÁNTOR & A. GULYÁS (2009): Investigation of human thermal comfort by observing the utilization of open air terraces in catering places. In: *Acta Climatologica Et Chorologica* 42-43: 29–37.
- ELIASSON, I. (2000): The use of climate knowledge in urban planning. In: *Landscape and Urban Planning* 48 (1-2): 31–44. DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00034-7.
- ELKHRACHY, I. (2015): Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). In: *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 18 (2): 261–278. DOI: 10.1016/j.ejrs.2015.06.007.
- EMRICH, C. T. & S. L. CUTTER (2011): Social Vulnerability to Climate-Sensitive Hazards in the Southern United States. In: *Weather, Climate, and Society* 3 (3): 193–208. DOI: 10.1175/2011WCAS1092.1.
- EPPEL, J., G. SANDER, P. SCHÖNFELD, G. KÖRBER & S. BÖLL (2012): Projekt Stadtgrün 2021 - Selektion, Anzucht und Verwendung von Gehölzen unter sich ändernden klimatischen Bedingungen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr.: KL/08/02. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. Veitshöchheim.
- EPPEL, J., G. SANDER, P. SCHÖNFELD, K. KÖRBER, S. BÖLL & J. V. HERRMANN (2015): Projekt Stadtgrün 2021. Selektion, Anzucht und Verwendung von Gehölzen unter sich ändernden Klimabedingungen. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. Veitshöchheim.
- FAHMY, M., S. SHARPLES & M. YAHYA (2010): LAI based trees selection for mid latitude urban developments: A microclimatic study in Cairo, Egypt. In: *Building and Environment* 45 (2): 345–357. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.06.014.
- FALK, W., K. MELLERT, U. BACHMANN-GIGL & C. KÖLLING (2013): Bäume für die Zukunft: Baumartenwahl auf wissenschaftlicher Grundlage. In: *LWF aktuell* (94): 8–11.
- FANGER, P. O. (1972): Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. New York: McGraw-Hill.
- FERNÁNDEZ, D. S. & M. A. LUTZ (2010): Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. In: *Engineering Geology* 111 (1–4): 90–98. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.12.006.
- FEW, R. & F. MATTHIES (2006): Flood hazards and health. Responding to present and future risks. London, Sterling, VA: Earthscan.
- FOUILLET, A., G. REY, V. WAGNER, K. LAAIDI, P. EMPEREUR-BISSONNET, A. LE TERTRE, P. FRAYSSINET, P. BESSEMOULIN, F. LAURENT, P. de CROUY-CHANEL, E. JOUGLA & D. HÉMON (2008): Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave. In: *International journal of epidemiology* 37 (2): 309–317. DOI: 10.1093/ije/dym253.
- FREI, C., R. SCHÖLL, S. FUKUTOME, J. SCHMIDLI & P. L. VIDALE (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111 (D6). DOI: 10.1029/2005JD005965.
- FRICH, P., L. V. ALEXANDER, P. DELLA-MARTA, B. GLEASON, M. HAYLOCK, A. M. G. KLEIN TANK & T. PETERSON (2002): Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. In: *Climate Research* 19: 193–212. DOI: 10.3354/cr019193.
- FRISCHBIER, N. (2014): Abgrenzung der forstlichen Vegetationszeit, 23.12.2014. e-Mail an Uwe Kurmutz.
- FRISCHBIER, N. & I. PROFFT (2008): Praxisorientierte Regionalisierung forstlich relevanter Klimawerte und -szenarien für Thüringen. In: *Forst und Holz* 63 (10): 24–30.

- FRÖHLICH, D. & A. MATZARAKIS (2013): Modeling of changes in thermal bioclimate: examples based on urban spaces in Freiburg, Germany. In: *Theoretical and Applied Climatology* 111 (3-4): 547–558. DOI: 10.1007/s00704-012-0678-y.
- FRÜH, B., M. KOBMANN & M. ROOS (2011): Frankfurt am Main im Klimawandel. Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung; eine Kooperation mit dem Umweltamt der Stadt Frankfurt am Main. Offenbach am Main: Selbstverl. des Dt. Wetterdienstes (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 237).
- FUCHS, L., M. LINDENBERG & U. EGGER (2012): Investigation of flooding of a large urban catchment. In: 9th International Conference on Urban Drainage Modeling. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/profile/Lothar\\_Fuchs/publication/236023995\\_Investigation\\_of\\_flooding\\_of\\_a\\_large\\_urban\\_catchment/links/0c960519f7d50b7008000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Lothar_Fuchs/publication/236023995_Investigation_of_flooding_of_a_large_urban_catchment/links/0c960519f7d50b7008000000.pdf).
- FÜSSEL, H.-M. & R. J. T. KLEIN (2006): Climate Change Vulnerability Assessments. An Evolution of Conceptual Thinking. In: *Climatic Change* 75 (3): 301–329. DOI: 10.1007/s10584-006-0329-3.
- GABRIEL, K. M. & W. R. ENDLICHER (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. In: *Environmental Pollution* 159 (8-9): 2044–2050. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.01.016.
- GAFFIN, S. R., C. ROSENZWEIG & A. Y. Y. KONG (2012): Adapting to climate change through urban green infrastructure. In: *Nature Climate Change* 2 (10): 704. DOI: 10.1038/nclimate1685.
- GALK-AKSB (Arbeitskreis Stadtbäume im Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V.) (2009): Positionspapier Klimawandel und Stadtbäume. Hg. v. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V. (GALK).
- GALK-AKSB (Arbeitskreis Stadtbäume im Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V.) (2014): GALK-Straßenbaumtest 2. Hg. v. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V. (GALK). Frankfurt am Main. Online verfügbar unter [http://www.galk.de/arbeitskreise/ak\\_stadtbaeume/akstb\\_strbaumtest2a.htm](http://www.galk.de/arbeitskreise/ak_stadtbaeume/akstb_strbaumtest2a.htm), zuletzt geprüft am 24.05.2016.
- GALK-AKSB (Arbeitskreis Stadtbäume im Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V.) (2016): GALK-Straßenbaumliste. Hg. v. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz e.V. (GALK). Frankfurt am Main. Online verfügbar unter [http://www.galk.de/arbeitskreise/ak\\_stadtbaeume/webprojekte/sbliste/](http://www.galk.de/arbeitskreise/ak_stadtbaeume/webprojekte/sbliste/), zuletzt geprüft am 24.05.2016.
- GASPER, R., A. BLOHM & M. RUTH (2011): Social and economic impacts of climate change on the urban environment. In: *Current Opinion in Environmental Sustainability* 3 (3): 150–157. DOI: 10.1016/j.cosust.2010.12.009.
- GEHRT, E. (2015): Übersetzungsschlüssel Bodenart der Bodenschätzung, 14.01.2015. e-Mail an Uwe Kurmutz.
- GEIGER, R. (1927): Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig.
- GEMBALLA, R., G. SCHLUTOW & A. SCHLUTOW (2007): Überarbeitung der forstlichen Klimagliederung. In: *AFZ - Der Wald* (15): 822–826.
- GILLNER, S., A. BRÄUNING & A. ROLOFF (2014): Dendrochronological analysis of urban trees. Climatic response and impact of drought on frequently used tree species. In: *Trees* 28 (4): 1079–1093. DOI: 10.1007/s00468-014-1019-9.
- GILLNER, S. & A. ROLOFF (2014): Eignungsempfehlungen für Stadtbäume unter den Bedingungen des Klimawandels. In: WENDE, W., S. RÖBLER & T. KRÜGER (HG.): Grundlagen für eine klimawandelangepasste Stadt- und Freiraumplanung. REGKLAM - Reihe Heft 6. 1. Aufl., neue Ausg. Berlin: Rhombos-Verlag (REGKLAM-Publikationsreihe, 6): 77–89.
- GILLNER, S., J. VOGT & A. ROLOFF (2013): Climatic response and impacts of drought on oaks at urban and forest sites. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 12 (4): 597–605. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.05.003.
- GOBER, P. (2010): Desert urbanization and the challenges of water sustainability. In: *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2 (3): 144–150. DOI: 10.1016/j.cosust.2010.06.006.
- GOLDBERG, V., C. KURBUHN & C. BERNHOFER (2013): How relevant is urban planning for the thermal comfort of pedestrians? Numerical case studies in two districts of the City of Dresden (Saxony/Germany). In: *Meteorologische Zeitschrift* 22 (6): 739–751. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0463.
- GOLDBLUM, D. & L. S. RIGG (2010): The Deciduous Forest – Boreal Forest Ecotone. In: *Geography Compass* 4 (7): 701–717. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2010.00342.x.



- GOSLING, S. N., J. A. LOWE, G. R. MCGREGOR, M. PELLING & B. D. MALAMUD (2009): Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. In: *Climatic Change* 92 (3-4): 299–341. DOI: 10.1007/s10584-008-9441-x.
- GREIVING, S. (2013): KlimaExWoSt Stadtklimatse. Entscheidungsunterstützung für die Stadtentwicklung. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR). Berlin. Online verfügbar unter <http://www.stadtklimatse.net>, zuletzt geprüft am 13.10.2016.
- GREIVING, S., M. ZEBISCH, S. SCHNEIDERBAUER, M. FLEISCHHAUER, C. LINDNER, J. LÜCKENKÖTTER, M. BUTH, W. KAHLENBORN & I. SCHAUER (2015): A consensus based vulnerability assessment to climate change in Germany. In: *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 7 (3): 306–326. DOI: 10.1108/IJCCSM-11-2013-0124.
- GRIESBAUER, H. P. & D. S. GREEN (2012): Geographic and temporal patterns in white spruce climate–growth relationships in Yukon, Canada. In: *Forest Ecology and Management* 267: 215–227. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.12.004.
- GRIMMOND, S. (2007): Urbanization and global environmental change. Local effects of urban warming. In: *The Geographical Journal* 173 (1): 83–88. DOI: 10.1111/j.1475-4959.2007.232\_3.x.
- GROISMAN, P. Y., R. W. KNIGHT, D. R. EASTERLING, T. R. KARL, G. C. HEGERL & V. N. RAZUVAEV (2005): Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. In: *Journal of Climate* 18 (9): 1326–1350. DOI: 10.1175/JCLI3339.1.
- GROSS, G. (1996): Stadtklima und globale Erwärmung. In: *Geowissenschaften* (14): 245–248.
- GROSS, G., J. GRAF & D. HEIMANN (2000): Simulation der regionalen und bodennahen lokalen Kaltluftabflüsse und Massenströme in Thüringen auf der Grundlage der TK 25. Hg. v. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG). Jena.
- GROSSI, C. M., P. BRIMBLECOMBE & I. HARRIS (2007): Predicting long term freeze–thaw risks on Europe built heritage and archaeological sites in a changing climate. In: *Science of The Total Environment* 377 (2-3): 273–281. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.02.014.
- GROSSMAN-CLARKE, S., S. SCHUBERT, T. A. CLARKE & S. L. HARLAN (2014): Extreme summer heat in Phoenix, Arizona (USA) under global climate change (2041-2070). In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 145 (1-2): 49–61.
- GUDE, M., U. KURMUTZ, J. MAERCKER, O. MUSTAFA & H. GRIEBSCH (2009): JenKAS - Jenaer Klima-Anpassungs-Strategie. Entwicklung eines Konzeptes zu integrierten Handlungsempfehlungen für Anpassung Klimawandel und Klimaschutz in Jena. Hg. v. Stadt Jena (StJe). Jena.
- GUHA-SAPIR, D., R. BELOW & P. HOYOIS (2009): EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database. Hg. v. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Ecole de Santé Publique, Université catholique de Louvain. Brüssel. Online verfügbar unter <http://www.emdat.be>, zuletzt geprüft am 15.06.2016.
- GUILLARD-GONÇALVES, C., S. L. CUTTER, C. T. EMRICH & J. L. ZÉZERE (2014): Application of Social Vulnerability Index (SoVI) and delineation of natural risk zones in Greater Lisbon, Portugal. In: *Journal of Risk Research*: 1–24. DOI: 10.1080/13669877.2014.910689.
- GUIRGUIS, K., A. GERSHUNOV, A. TARDY & R. BASU (2014): The Impact of Recent Heat Waves on Human Health in California. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 53 (1): 3–19. DOI: 10.1175/JAMC-D-13-0130.1.
- HAINES, A., R. S. KOVATS, D. CAMPBELL-LENDNUM & C. CORVALAN (2006): Climate change and human health: impacts, vulnerability and public health. In: *Public health* 120 (7): 585–596. DOI: 10.1016/j.puhe.2006.01.002.
- HAJAT, S., M. O'CONNOR & T. KOSATSKY (2010): Health effects of hot weather. From awareness of risk factors to effective health protection. In: *The Lancet* 375 (9717): 856–863. DOI: 10.1016/S0140-6736(09)61711-6.
- HALBIG, G., U. KURMUTZ & D. KNOPF (2016): Klimawandelgerechtes Stadtgrün. In: *Informationen zur Raumentwicklung* (6): 533–547.
- HALLEGATTE, S., C. GREEN, R. J. NICHOLLS & J. CORFEE-MORLOT (2013): Future flood losses in major coastal cities. In: *Nature Climate Change* 3 (9): 802–806. DOI: 10.1038/nclimate1979.
- HAMANN, A. & T. WANG (2006): Potential Effects Of Climate Change On Ecosystem And Tree Species Distribution In British Columbia. In: *Ecology* 87 (11): 2773–2786. DOI: 10.1890/0012-9658(2006)87[2773:PEOCCO]2.0.CO;2.

- HANNA, S. R., M. J. BROWN, F. E. CAMELLI, S. T. CHAN, W. J. COIRIER, S. KIM, O. R. HANSEN, A. H. HUBER & R. M. REYNOLDS (2006): Detailed Simulations of Atmospheric Flow and Dispersion in Downtown Manhattan: An Application of Five Computational Fluid Dynamics Models. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 87 (12): 1713–1726. DOI: 10.1175/BAMS-87-12-1713.
- HANSEN, A., P. BI, M. NITSCHKE, P. RYAN, D. PISANIELLO & G. TUCKER (2008): The effect of heat waves on mental health in a temperate Australian city. In: *Environmental health perspectives* 116 (10): 1369–1375. DOI: 10.1289/ehp.11339.
- HARLAN, S. L., A. J. BRAZEL, L. PRASHAD, W. L. STEFANOV & L. LARSEN (2006): Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. In: *Social science & medicine* (1982) 63 (11): 2847–2863. DOI: 10.1016/j.socscimed.2006.07.030.
- HEBBERT, M. (2014): Climatology for city planning in historical perspective. In: *Urban Climate* 10: 204–215. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.07.001.
- HEBBERT, M. & V. JANKOVIC (2013): Cities and Climate Change: The Precedents and Why They Matter. In: *Urban Studies* 50 (7): 1332–1347. DOI: 10.1177/0042098013480970.
- HELBIG, A. (2003): Zur Geschichte der Umweltmeteorologie. In: *promet* 30 (1/2): 2–14.
- HELDENS, W. (2010): Use of airborne hyperspectral data and height information to support urban micro climate characterisation.
- HELLMANN, J. J., J. E. BYERS, B. G. BIERWAGEN & J. S. DUKES (2008): Five Potential Consequences of Climate Change for Invasive Species. In: *Conservation Biology* 22 (3): 534–543. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2008.00951.x.
- HICKLER, T., K. VOHLAND, J. FEEHAN, P. A. MILLER, B. SMITH, L. COSTA, T. GIESECKE, S. FRONZEK, T. R. CARTER, W. CRAMER, I. KÜHN & M. T. SYKES (2012): Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. In: *Global Ecology and Biogeography* 21 (1): 50–63. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00613.x.
- HIEN, W. N., M. IGNATIUS, A. ELIZA, S. K. JUSUF & R. SAMSUDIN (2012): Comparison of STEVE and ENVI-met as temperature prediction models for Singapore context. In: *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development* 3 (3): 197–209. DOI: 10.1080/2093761X.2012.720224.
- HINKEL, J. (2011): "Indicators of vulnerability and adaptive capacity": Towards a clarification of the science-policy interface 21: 198–208. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002.
- HLUG & LGBRP (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz) (Hg.) (2008): Großmaßstäbige Bodeninformationen für Hessen und Rheinland-Pfalz. Auswertung von Bodenschätzungsdaten zur Ableitung von Bodenfunktionen und -eigenschaften. Wiesbaden.
- HOECHSTETTER, S., T. KRÜGER, V. GOLDBERG, C. KURBUHN, J. HENNERSDORF & I. LEHMANN (2010): Using geospatial data for assessing thermal stress in cities. In: CAR, A., G. GRIESEBNER & J. STROBL (HG.): *Geospatial crossroads @ GI\_Forum '10*. Proceedings of the Geoinformatics Forum Salzburg. Berlin: Wichmann; Offenbach: 101–110.
- HOFFMANN, K., W. BIVOUR, B. FRÜH, M. KOBMANN & P.-H. VOB (2014): Klimauntersuchungen in Jena für die Anpassung an den Klimawandel und seine erwarteten Folgen. Ein Ergebnisbericht. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst, Deutsche Meteorologische Bibliothek (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 243).
- HOFIERKA, J. & M. KNUTOVÁ (2015): Simulating spatial aspects of a flash flood using the Monte Carlo method and GRASS GIS. A case study of the Malá Svinka Basin (Slovakia). In: *Open Geosciences* 7 (1). DOI: 10.1515/geo-2015-0013.
- HOFIERKA, J., H. MITASOVA, L. MITAS & B. PARTICLES (2002): GRASS and modeling landscape processes using duality between particles and fields. In: CIOLLI, M. & P. ZATELLI (HG.): *Proceedings of the "Open Source Free Software GIS - GRASS users conference 2002"*. Open Source Free Software GIS - GRASS users conference 2002. Trento, 11-13 September 2002. Online verfügbar unter <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.20.887>.
- HOGG, E. H., J. P. BRANDT & M. MICHAELIAN (2008): Impacts of a regional drought on the productivity, dieback, and biomass of western Canadian aspen forests. In: *Canadian Journal of Forest Research* 38 (6): 1373–1384. DOI: 10.1139/X08-001.

- HONDA, Y., M. KONDO, G. MCGREGOR, H. KIM, Y.-L. GUO, Y. HIJIOKA, M. YOSHIKAWA, K. OKA, S. TAKANO, S. HALES & R. S. KOVATS (2014): Heat-related mortality risk model for climate change impact projection. In: *Environmental Health and Preventive Medicine* 19 (1): 56–63. DOI: 10.1007/s12199-013-0354-6.
- HÖPPE, P. (1999): The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. In: *International journal of biometeorology* 43 (2): 71–75. DOI: 10.1007/s004840050118.
- HOWARD, G., K. CHARLES, K. POND, A. BROOKSHAW, R. HOSSAIN & J. BARTRAM (2010): Securing 2020 vision for 2030: climate change and ensuring resilience in water and sanitation services. In: *Journal of Water and Climate Change* 1 (1): 2–16. DOI: 10.2166/wcc.2010.105.
- HOWARD, L. (1833): The climate of London. Deduced from meteorological observations, made in the metropolis, and at various places around it. Volume 1. London.
- HUANG, C., P. VANECKOVA, X. WANG, G. FITZGERALD, Y. GUO & S. TONG (2011): Constraints and Barriers to Public Health Adaptation to Climate Change. In: *American journal of preventive medicine* 40 (2): 183–190. DOI: 10.1016/j.amepre.2010.10.025.
- HUANG, W., H. KAN & S. KOVATS (2010): The impact of the 2003 heat wave on mortality in Shanghai, China. In: *The Science of the total environment* 408 (11): 2418–2420. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.02.009.
- HUGHES, M., E. OAKSFORD & M. BLAKESLEE (2015): Urban tree selection guide. A Designer's List of Appropriate Trees for the Urban Mid-Atlantic. Hg. v. Casey Trees. Washington, DC. Online verfügbar unter <http://caseytrees.org/resources/publications/urban-tree-selection-guide/>, zuletzt geprüft am 24.05.2016.
- HUPFER, P. & W. KUTTLER (Hg.) (2006): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12., überarb. Aufl. Wiesbaden: Teubner (Lehrbuch).
- HURLIMANN, A. C. & A. P. MARCH (2012): The role of spatial planning in adapting to climate change. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 3 (5): 477–488. DOI: 10.1002/wcc.183.
- IGLESIAS, A., L. GARROTE, S. QUIROGA & M. MONEO (2012): A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe. In: *Climatic Change* 112 (1): 29–46. DOI: 10.1007/s10584-011-0338-8.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): Climate change 2007. Impacts, adaptation and vulnerability : Working Group II contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC Secretariat.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2012): Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014a): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014b): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014c): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014d): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- IVERSON, L. R. & A. M. PRASAD (2002): Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US. In: *Forest Ecology in the next Millennium : Putting the long view into Practice* 155 (1–3): 205–222. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00559-X.
- JACOB, D. J. & D. A. WINNER (2009): Effect of climate change on air quality. In: *Atmospheric Environment* 43 (1): 51–63. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.051.

- JACOB, K., G. DEODATIS, J. ATLAS, M. WHITCOMB & M. LOPEMAN (2011): Transportation. In: ROSENZWEIG, C., W. SOLECKI, M. DEGAETANO, S. H. O'GRADY & P. GRABHORN (HG.): Responding to Climate Change in New York State: The ClimAID Integrated Assessment for Effective Climate Change Adaptation. Technical Report. Albany: 299–362.
- JACOBS, K. & S. WILLIAMS (2011): What to do now? Tensions and Dilemmas in Responding to Natural Disasters: A Study of Three Australian State Housing Authorities. In: *International Journal of Housing Policy* 11 (2): 175–193. DOI: 10.1080/14616718.2011.573206.
- JANKOVIĆ, V. (2013): A historical review of urban climatology and the atmospheres of the industrialized world. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 4 (6): 539–553. DOI: 10.1002/wcc.244.
- JENDRITZKY, G. (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: ENDLICHER, W. (HG.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam: Potsdam-Inst. für Klimafolgenforschung: 108–118.
- JENDRITZKY, G., R. de DEAR & G. HAVENITH (2012): UCI--why another thermal index? In: *International journal of biometeorology* 56 (3): 421–428. DOI: 10.1007/s00484-011-0513-7.
- JHA, A. K., R. BLOCH & J. LAMOND (2012): Cities and Flooding. A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century: The World Bank.
- JOHANSSON, E., J. SPANGENBERG, M. L. GOUVÊA & E. D. FREITAS (2013): Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of São Paulo, Brazil. In: *Urban Climate* 6: 24–43. DOI: 10.1016/j.uclim.2013.08.003.
- JOHNSON, D. P., A. STANFORTH, V. LULLA & G. LUBER (2012): Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data. In: *Applied Geography* 35 (1-2): 23–31. DOI: 10.1016/j.apgeog.2012.04.006.
- JOLLANDS, N., M. RUTH, C. BERNIER & N. GOLUBIEWSKI (2007): The climate's long-term impact on New Zealand infrastructure (CLINZI) project—A case study of Hamilton City, New Zealand. In: *Journal of Environmental Management* 83 (4): 460–477. DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.09.022.
- JONKMAN, S. N. & I. KELMAN (2005): An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. In: *Disasters* 29 (1): 75–97. DOI: 10.1111/j.0361-3666.2005.00275.x.
- JÖNSSON, A. M., G. APPELBERG, S. HARDING & L. BÄRRING (2009): Spatio-temporal impact of climate change on the activity and voltinism of the spruce bark beetle, *Ips typographus*. In: *Global Change Biology* 15 (2): 486–499. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01742.x.
- JÖNSSON, A. M., S. HARDING, P. KROKENE, H. LANGE, Å. LINDELÖW, B. ØKLAND, H. P. RAVN & L. M. SCHROEDER (2011): Modelling the potential impact of global warming on *Ips typographus* voltinism and reproductive diapause. In: *Climatic Change* 109 (3-4): 695–718. DOI: 10.1007/s10584-011-0038-4.
- JULIEN, P. Y., B. SAGHAFIAN & F. L. OGDEN (1995): Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff. In: *Journal of the American Water Resources Association* 31 (3): 523–536. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1995.tb04039.x.
- KALKSTEIN, L. S. & J. S. GREENE (1997): An evaluation of climate/mortality relationships in large U.S. cities and the possible impacts of a climate change. In: *Environmental Health Perspectives* 105 (1): 84–93.
- KASSON, M. T. & W. H. LIVINGSTON (2012): Relationships among beech bark disease, climate, radial growth response and mortality of American beech in northern Maine, USA. In: *Forest Pathology* 42 (3): 199–212. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2011.00742.x.
- KATZSCHNER, L. & S. KUPSKI (2015): Urban climatic map studies: Hesse. In: NG, E. & C. REN (HG.): The urban climatic map. A methodology for sustainable urban planning: 121–128.
- KEARNEY, M., W. P. PORTER, C. WILLIAMS, S. RITCHIE & A. A. HOFFMANN (2009): Integrating biophysical models and evolutionary theory to predict climatic impacts on species' ranges. The dengue mosquito *Aedes aegypti* in Australia. In: *Functional Ecology* 23 (3): 528–538. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2008.01538.x.
- KEMPER, T., R. RIECHEL & T. SCHULLER (2011): Kommunen im Klimawandel – Wege zur Anpassung. Modellvorhaben der Raumordnung zur Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen. Hg. v. Regionalverband FrankfurtRheinMain. Frankfurt am Main.
- KENDON, E. J., D. P. ROWELL, R. G. JONES & E. BUONOMO (2008): Robustness of Future Changes in Local Precipitation Extremes. In: *Journal of Climate* 21 (17): 4280–4297. DOI: 10.1175/2008JCLI2082.1.

- KETTERER, C. & A. MATZARAKIS (2014): Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by re-planning measures in Stuttgart, Germany. In: *Landscape and Urban Planning* 122: 78–88. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.003.
- KHARIN, V. V., F. W. ZWIERS, X. ZHANG & M. WEHNER (2013): Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. In: *Climatic Change* 119 (2): 345–357. DOI: 10.1007/s10584-013-0705-8.
- KIKTEV, D., D. M. H. SEXTON, L. ALEXANDER & C. K. FOLLAND (2003): Comparison of Modeled and Observed Trends in Indices of Daily Climate Extremes. In: *Journal of Climate* 16 (22): 3560–3571. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<3560:COMAOT>2.0.CO;2.
- KIM, K. R., C. YI, J.-S. LEE, F. MEIER, B. JÄNICKE, U. FEHRENBACH & D. SCHERER (2014): BioCAS: Biometeorological Climate impact Assessment System for building-scale impact assessment of heat-stress related mortality. In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 145 (1-2): 62–79.
- KITHA, J. & A. LYTH (2011): Urban wildscapes and green spaces in Mombasa and their potential contribution to climate change adaptation and mitigation. In: *Environment and Urbanization* 23 (1): 251–265. DOI: 10.1177/0956247810396054.
- KLEIN ROSENTHAL, J., P. L. KINNEY & K. B. METZGER (2014): Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997–2006. In: *Health & place* 30: 45–60. DOI: 10.1016/j.healthplace.2014.07.014.
- KLEIN TANK, A. M. G. & G. P. KÖNNEN (2003): Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. In: *Journal of Climate* 16 (22): 3665–3680. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<3665:THODT>2.0.CO;2.
- KLUGE, G. & G. MÜLLER-WESTERMEIER (2000): Das Klima ausgewählter Orte in der BRD: Jena. Offenbach: Selbstverl. d. Dt. Wetterdienstes (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 213).
- KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) (2015a): KNMI Climate Change Atlas. GCM: CMIP5 (full set) - maximum near-surface temperature. Hg. v. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Online verfügbar unter [http://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](http://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py), zuletzt geprüft am 02.05.2015.
- KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) (2015b): KNMI Climate Change Atlas. GCM: CMIP5 extremes (full set) - TX90p: percentage of days when TX > 90th percentile. Hg. v. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Online verfügbar unter [http://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](http://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py), zuletzt geprüft am 02.05.2015.
- KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) (2016a): KNMI Climate Change Atlas. GCM: CMIP5 (full set) - P-E, net water flux (Apr-Oct). Hg. v. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Online verfügbar unter [http://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](http://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py), zuletzt geprüft am 28.05.2016.
- KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) (2016b): KNMI Climate Change Atlas. GCM: CMIP5 (full set) - P-E, net water flux (Mar-Oct). Hg. v. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Online verfügbar unter [http://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](http://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py), zuletzt geprüft am 28.05.2016.
- KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) (2016c): KNMI Climate Change Atlas. GCM: CMIP5 extremes (full set) - maximum length of dry spell (CCD). Hg. v. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Online verfügbar unter [http://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](http://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py), zuletzt geprüft am 26.07.2016.
- KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) (2016d): KNMI Climate Change Atlas. GCM: CMIP5 extremes (full set) - R20mm: annual count of days when PRCP => 20mm. Hg. v. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Online verfügbar unter [http://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](http://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py), zuletzt geprüft am 26.07.2016.
- KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) (2016e): KNMI Climate Change Atlas. GCM: CMIP5 extremes (full set) - R99pTOT: annual total PRCP when RR > 99p. Hg. v. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Online verfügbar unter [http://climexp.knmi.nl/plot\\_atlas\\_form.py](http://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py), zuletzt geprüft am 26.07.2016.
- KNOCH, K. (1963): Die Landesklimateaufnahme. Wesen und Methodik. Offenbach am Main (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 85).
- KNOPF, D. (2016): Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel - Stadtbaumkonzept für die Stadt Jena. In: ROLOFF, A., D. THIEL & H. WEIß (HG.): Aktuelle Fragen der Baumpflege und Umgang mit alten Bäumen/neuen Baumarten. Tagungsband Dresdner StadtBaumtage 10./11.03.2016. Tharandt (Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt, 18): 16–30.

- KNOFF, D., A. ROLOFF, U. BOOCK & M. LERM (2016): Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel - Stadtbaumkonzept Jena. Hg. v. Stadt Jena (StJe). Jena (Schriften zur Stadtentwicklung, 7).
- KOCH, H. G. (1953): Wetterheimatkunde von Thüringen. Jena.
- KOETSE, M. J. & P. RIETVELD (2009): The impact of climate change and weather on transport. An overview of empirical findings. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 14 (3): 205–221. DOI: 10.1016/j.trd.2008.12.004.
- KÖLLING, C. (2007): Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. In: *AFZ - Der Wald* (23): 1242–1245.
- KÖLLING, C., M. BACHMANN, W. FALK, S. GRÜNERT, R. SCHALLER, S. TRETTER & G. WILHELM (2009): Klimarisikokarten für heute und morgen. In: *AFZ - Der Wald* (15): 806–810.
- KOLSTAD, E. W. & K. A. JOHANSSON (2010): Uncertainties Associated with Quantifying Climate Change Impacts on Human Health. A Case Study for Diarrhea. In: *Environmental Health Perspectives* 119 (3): 299–305. DOI: 10.1289/ehp.1002060.
- KOPPE, C. (2005): Gesundheitsrelevante Bewertung von thermischer Belastung unter Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der Bevölkerung an die lokalen Witterungsverhältnisse.
- KOTTEK, M., J. GRIESER, C. BECK, B. RUDOLF & F. RUBEL (2006): World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. In: *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3): 259–263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- KOVATS, R. S. & S. HAJAT (2008): Heat stress and public health: a critical review. In: *Annual review of public health* 29: 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.
- KRATZER, A. (1937): Das Stadtklima. Braunschweig: Vieweg.
- KRÜGER, E. L., F. O. MINELLA & F. RASIA (2011): Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. In: *Building and Environment* 46 (3): 621–634. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.09.006.
- KRÜGER, T., F. HELD, S. HOECHSTETTER, V. GOLDBERG, T. GEYER & C. KURBJUHN (2013): A new heat sensitivity index for settlement areas. In: *Urban Climate* 6: 63–81. DOI: 10.1016/j.uclim.2013.09.003.
- KUNDZEWICZ, Z. W., M. RADZIEJEWSKI & I. PINSKWAR (2006): Precipitation extremes in the changing climate of Europe. In: *Climate Research* (31): 51–58.
- KUNII, O., S. NAKAMURA, R. ABDUR & S. WAKAI (2002): The impact on health and risk factors of the diarrhoea epidemics in the 1998 Bangladesh floods. In: *Public health* 116 (2): 68–74. DOI: 10.1038/sj.ph.1900828.
- KURMUTZ, U., M. GUDE, J. MAERCKER, D. KNOFF, S. KNETSCH, O. GEBHARDT, H. KOBER, M. LERM, F. REINHARDT, Y. SITTIG & B. VETTER (2012): Handbuch Klimawandelgerechte Stadtentwicklung für Jena. ExWoSt-Modellprojekt Jenaer Klimaanpassungsstrategie JenKAS. Hg. v. Stadt Jena (StJe). Jena (Schriften zur Stadtentwicklung, 3).
- KURMUTZ, U., J. MAERCKER, D. KNOFF & M. GUINARD RUDAT (2016): Klimaanpassungsstrategie für die Stadt Zwickau. Hg. v. Stadt Zwickau. Zwickau.
- KUTTLER, W. (2004a): Stadtklima. Teil 1: Grundzüge und Ursachen. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 16 (3): 187–199.
- KUTTLER, W. (2004b): Stadtklima. Teil 2: Phänomene und Wirkungen. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 16 (4): 263–274. DOI: 10.1065/uwsf2004.08.083.
- KUTTLER, W. (2011): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen / Climate change in urban areas, Part 1, Effects. In: *Environmental Sciences Europe* 23 (1): 1. DOI: 10.1186/2190-4715-23-11.
- KUTTLER, W. (2012): Climate Change on the Urban Scale – Effects and Counter-Measures in Central Europe. In: CHHETRI, N. (HG.): Human and Social Dimensions of Climate Change: InTech.
- KUTTLER, W., A.-B. BARLAG & F. ROBMANN (1996): Study of the thermal structure of a town in a narrow valley. In: *Atmospheric Environment* 30 (3): 365–378. DOI: 10.1016/1352-2310(94)00271-1.
- KYSELÝ, J. (2009): Trends in heavy precipitation in the Czech Republic over 1961–2005. In: *International Journal of Climatology* 29 (12): 1745–1758. DOI: 10.1002/joc.1784.
- LAMOND, J., C. BOOTH, F. HAMMOND & D. PROVERBS (2012): Flood hazards. Impacts and responses for the built environment. Boca Raton: CRC Press.
- LANDSBERG, H. E. (1981): The urban climate. New York, N.Y. [u.a.]: Acad. Press.

- LANUV-NRW (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen) (2013): Klimawandel in Stadtentwässerung und Stadtentwicklung. Methoden und Konzepte. Düsseldorf.
- LARSEN, P., S. GOLDSMITH, O. SMITH, M. WILSON, K. STRZEPEK, P. CHINOWSKY & B. SAYLOR (2008): Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. In: *Global Environmental Change* 18 (3): 442–457. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.03.005.
- LASCH-BORN, P., F. SUCKOW, M. GUTSCH, C. REYER, Y. HAUF, A. MURAWSKI & T. PILZ (2015): Forests under climate change - Potential risks and opportunities. In: *Meteorologische Zeitschrift* 24 (2): 157–172. DOI: 10.1127/metz/2014/0526.
- LAU, K. K.-L. (2015): Future meteorological data and their implications for urban climatic studies. In: NG, E. & C. REN (Hg.): The urban climatic map. A methodology for sustainable urban planning: 389–396.
- LAVALLE, C., F. MICALE, T. D. HOUSTON, A. CAMIA, R. HIEDERER, C. LAZAR, C. CONTE, G. AMATULLI & G. GENOVESE (2009): Climate change in Europe. 3. Impact on agriculture and forestry. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 29 (3): 433–446. DOI: 10.1051/agro/2008068.
- LAZAR, R., M. F. BUCHROITHNER & V. KAUFMANN (1994): Stadtklimaanalyse Graz. Graz: Magistrat Graz, Stadtplanungsamt (Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz, 32).
- LEAKEY, A. D. B. (2009): Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276 (1666): 2333–2343. DOI: 10.1098/rspb.2008.1517.
- LEHMANN, J., D. COUMOU & K. FRIELER (2015): Increased record-breaking precipitation events under global warming. In: *Climatic Change*. DOI: 10.1007/s10584-015-1434-y.
- LIN, S., M. LUO, R. J. WALKER, X. LIU, S.-A. HWANG & R. CHINERY (2009): Extreme high temperatures and hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases. In: *Epidemiology (Cambridge, Mass.)* 20 (5): 738–746. DOI: 10.1097/EDE.0b013e3181ad5522.
- LIN, T.-P., A. MATZARAKIS & R.-L. HWANG (2010): Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. In: *Building and Environment* 45 (1): 213–221. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.06.002.
- LINDERHOLM, H. W. (2006): Growing season changes in the last century. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 137 (1-2): 1–14. DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.03.006.
- LINDNER, M., M. MAROSCHEK, S. NETHERER, A. KREMER, A. BARBATI, J. GARCIA-GONZALO, R. SEIDL, S. DELZON, P. CORONA, M. KOLSTRÖM, M. J. LEXER & M. MARCHETTI (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. In: *Forest Ecology and Management* 259 (4): 698–709. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.023.
- LINDQVIST, S., J. O. MATTSSON & B. HOLMER (1983): Lokalklimatiska kartor för användning i kommunal översiktlig planering. Stockholm (Rapport, 38).
- LOBELL, D. B., G. L. HAMMER, G. MCLEAN, C. MESSINA, M. J. ROBERTS & W. SCHLENKER (2013): The critical role of extreme heat for maize production in the United States. In: *Nature Climate Change* 3 (5): 497–501. DOI: 10.1038/nclimate1832.
- LOKOSHCHENKO, M. A. & I. A. KORNEVA (2015): Underground urban heat island below Moscow city. In: *Urban Climate* 13: 1–13. DOI: 10.1016/j.uclim.2015.04.002.
- LOUGHNAN, M., N. NICHOLLS & N. TAPPER (2009): Hot Spots Project: A spatial vulnerability analysis of urban populations to extreme heat events. Hg. v. Victorian Government, Department of Health. Victoria.
- LOVE, G., A. SOARES & H. PÜEMPEL (2010): Climate Change, Climate Variability and Transportation. In: *Procedia Environmental Sciences* 1: 130–145. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.09.010.
- LOWRY, W. P. (1974): Project METROMEX: its history, status, and future. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 55 (2): 87–88.
- LU, P., Q. YU, J. LIU & X. LEE (2006): Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 138 (1–4): 120–131. DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.04.002.
- LUBER, G. & M. MCGEEHIN (2008): Climate change and extreme heat events. In: *American journal of preventive medicine* 35 (5): 429–435. DOI: 10.1016/j.amepre.2008.08.021.
- LUCENA, A. de, A. S. SZKLO, R. SCHAEFFER, R. R. de SOUZA, B. S. BORBA, I. V. DA COSTA, A. O. JÚNIOR & S. H. DA CUNHA (2009): The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. In: *Energy Policy* 37 (3): 879–889. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.10.029.

- LUCK, J., M. SPACKMAN, A. FREEMAN, P. TRE, BICKI, W. GRIFFITHS, K. FINLAY & S. CHAKRABORTY (2011): Climate change and diseases of food crops. In: *Plant Pathology* 60 (1): 113–121. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2010.02414.x.
- ŁUPIKASZA, E. B., S. HÄNSEL & J. MATSCHULLAT (2011): Regional and seasonal variability of extreme precipitation trends in southern Poland and central-eastern Germany 1951–2006. In: *International Journal of Climatology* 31 (15): 2249–2271. DOI: 10.1002/joc.2229.
- MALHI, Y., L. E. O. C. ARAGÃO, D. GALBRAITH, C. HUNTINGFORD, R. FISHER, P. ZELAZOWSKI, S. SITCH, C. MCSWEENEY & P. MEIR (2009): Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced die-back of the Amazon rainforest. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (49): 20610–20615. DOI: 10.1073/pnas.0804619106.
- MALLER, C. J. & Y. STRENGERS (2011): Housing, heat stress and health in a changing climate. Promoting the adaptive capacity of vulnerable households, a suggested way forward. In: *Health Promotion International* 26 (4): 492–498. DOI: 10.1093/heapro/dar003.
- MANIAK, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. In: *Hydrologie und Wasserwirtschaft*.
- MARAS, I., M. BUTTSTÄDT, J. HAHMANN, H. HOFMEISTER & C. SCHNEIDER (2013): Investigating public places and impacts of heat stress in the city of Aachen, Germany. In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 144 (3-4): 290–303.
- MATEI, D. (2012): Runoff modeling using GIS. Application in torrential basins in the Apuseni Mountains. Dissertation. Cluj-Napoca.
- MATZARAKIS, A. (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas (Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 6).
- MATZARAKIS, A., H. MAYER & M. G. IZIOMON (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. In: *International journal of biometeorology* 43 (2): 76–84. DOI: 10.1007/s004840050119.
- MATZARAKIS, A. & F. RUTZ (2005): Application of Rayman for tourism and climate investigations. In: *Annalen der Meteorologie* 41 (2): 631–636.
- MATZARAKIS, A., F. RUTZ & H. MAYER (2006): Modelling the thermal bioclimate in urban areas with the Ray-Man Model. In: The proceedings of the 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture : PLEA2006 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture Geneva Switzerland 6 – 8 September 2006: ??-??
- MATZARAKIS, A., F. RUTZ & H. MAYER (2007): Modelling radiation fluxes in simple and complex environments-application of the RayMan model. In: *International journal of biometeorology* 51 (4): 323–334. DOI: 10.1007/s00484-006-0061-8.
- MAYER, H. (1988): Results from research programme 'Stadtklima Bayern' for urban planning. In: *Energy and Buildings* 11 (1-3): 115–121.
- MCGRANAHAN, G., D. BALK & B. ANDERSON (2007): The rising tide. Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. In: *Environment and Urbanization* 19 (1): 17–37. DOI: 10.1177/0956247807076960.
- MCGRATH, J. M. & D. B. LOBELL (2011): An independent method of deriving the carbon dioxide fertilization effect in dry conditions using historical yield data from wet and dry years. In: *Global Change Biology* 17 (8): 2689–2696. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02406.x.
- MCGUIRE, A. D., F. S. C. III, C. WIRTH, M. APPS, J. BHATTI, T. CALLAGHAN, T. R. CHRISTENSEN, J. S. CLEIN, M. FUKUDA, T. MAXIMOV, A. ONUCHIN, A. SHVIDENKO & E. VAGANOV (2007): Responses of High Latitude Ecosystems to Global Change: Potential Consequences for the Climate System: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter [http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-32730-1\\_24.pdf](http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-32730-1_24.pdf).
- MCMICHAEL, A. J. (2003): Human health and climate change in Oceania. A risk assessment 2002. Canberra: Commonwealth Dept. of Health and Ageing.
- MCMICHAEL, A. J., R. E. WOODRUFF & S. HALES (2006): Climate change and human health: present and future risks. In: *The Lancet* 367 (9513): 859–869. DOI: 10.1016/S0140-6736(06)68079-3.



- MEASHAM, T. G., B. L. PRESTON, T. F. SMITH, C. BROOKE, R. GORDDARD, G. WITHYCOMBE & C. MORRISON (2011): Adapting to climate change through local municipal planning: barriers and challenges. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 16 (8): 889–909. DOI: 10.1007/s11027-011-9301-2.
- MENBERG, K., P. BAYER, K. ZOSEDER, S. RUMOHR & P. BLUM (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. In: *The Science of the total environment* 442: 123–133. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.10.043.
- MENKE, P., J. PETERS, J. BAUER, J. ROHRBACH, A. KIPAR & K.-F. LEY (2014): Bäume in der Stadt. Wertvolle Gestalten im öffentlichen Raum. Hg. v. Stiftung Die Grüne Stadt. Düsseldorf.
- MENZEL, A. & P. FABIAN (1999): Growing season extended in Europe. In: *Nature* 397 (6721): 659. DOI: 10.1038/17709.
- MENZEL, A., G. JAKOBI, R. AHAS, H. SCHEIFINGER & N. ESTRELLA (2003): Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries. In: *International Journal of Climatology* 23 (7): 793–812. DOI: 10.1002/joc.915.
- MEON, G., K. STEIN, K. FÖRSTER & G. RIEDEL (2009): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Untersuchung starkregengefährdeter Gebiete“. Hg. v. Bezirksregierung Detmold. Detmold.
- MICHELOZZI, P., G. ACCETTA, M. de SARIO, D. D'IPPOLITI, C. MARINO, M. BACCINI, A. BIGGERI, H. R. ANDERSON, K. KATSOUYANNI, F. BALLESTER, L. BISANTI, E. CADUM, B. FORSBERG, F. FORASTIERE, P. G. GOODMAN, A. HOIS, U. KIRCHMAYER, S. MEDINA, A. PALDY, C. SCHINDLER, J. SUNYER & C. A. PERUCCI (2009): High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities. In: *American journal of respiratory and critical care medicine* 179 (5): 383–389. DOI: 10.1164/rccm.200802-217OC.
- MIDEKSA, T. K. & S. KALLBEKKEN (2010): The impact of climate change on the electricity market. A review. In: *Energy Policy* 38 (7): 3579–3585. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.02.035.
- MILLS, G. (2014): Urban climatology: History, status and prospects. In: *Urban Climate* 10: 479–489. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.06.004.
- MILLS, G., H. CLEUGH, R. EMMANUEL, W. ENDLICHER, E. ERELL, G. MCGRANAHAN, E. NG, A. NICKSON, J. ROSENTHAL & K. STEEMER (2010): Climate Information for Improved Planning and Management of Mega Cities (Needs Perspective). In: *Procedia Environmental Sciences* 1: 228–246. DOI: 10.1016/j.proenv.2010.09.015.
- MIN, S.-K., X. ZHANG, F. W. ZWIERS & G. C. HEGERL (2011): Human contribution to more-intense precipitation extremes. In: *Nature* 470 (7334): 378–381. DOI: 10.1038/nature09763.
- MIRASGEDIS, S., Y. SARAFIDIS, E. GEORGOPOULOU, V. KOTRONI, K. LAGOUVARDOS & D. P. LALAS (2007): Modeling framework for estimating impacts of climate change on electricity demand at regional level. Case of Greece. In: *Energy Conversion and Management* 48 (5): 1737–1750. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.10.022.
- MIRSCHER, W., R. WIELAND, K.-O. WENKEL, C. NENDEL & C. GUDDAT (2014): YIELDSTAT – A spatial yield model for agricultural crops. In: *European Journal of Agronomy* 52: 33–46. DOI: 10.1016/j.eja.2013.09.015.
- MITASOVA, H., C. THAXTON, J. HOFIERKA, R. MCLAUGHLIN, A. MOORE & L. MITAS (2004): Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS. In: *Computational Methods in Water Resources: Volume 2, Proceedings of the XVth International Conference on Computational Methods in Water Resources*, Bd. 55: Elsevier (Developments in Water Science): 1479–1490.
- MITCHEL, T. D. & M. HULME (2002): Length of the growing season. In: *Weather* 57 (5): 196–198.
- MITLIN, D. & D. SATTERTHWAITE (2013): Urban poverty in the global South. Scale and nature. New York: Routledge.
- MKRO (Ministerkonferenz für Raumordnung) (2009): Beschluss der 36. Ministerkonferenz für Raumordnung am 10. Juni 2009 in Berlin „Raumordnung und Klimawandel“. Berlin.
- MOBERG, A. & P. D. JONES (2005): Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation in central and western Europe, 1901–99. In: *International Journal of Climatology* 25 (9): 1149–1171. DOI: 10.1002/joc.1163.
- MONTEIRO, A. & S. VELHO (2014): Health heat stress in the Porto Metropolitan Area – a matter of temperature or inadequate adaptation? In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 145 (1-2): 80–95.

- MORIYAMA, M. & H. TAKEBAYASHI (1999): Making method of "Klimatope" map based on normalized vegetation index and one-dimensional heat budget model. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 81 (1–3): 211–220. DOI: 10.1016/S0167-6105(99)00018-5.
- MRE (Münchener Rückversicherungsgesellschaft) (1999): Naturkatastrophen in Deutschland. Schadenerfahrungen und Schadenpotentiale. München.
- MROSE, H. (1939): Der Mühlthalwind als Frischluftspender für das Jenaer Westviertel. In: *Zeitschrift für angewandte Meteorologie* 56 (12): 377–383.
- MUELLER, R. C., C. M. SCUDDER, M. E. PORTER, R. TALBOT TROTTER, C. A. GEHRING & T. G. WHITHAM (2005): Differential tree mortality in response to severe drought: evidence for long-term vegetation shifts. In: *Journal of Ecology* 93 (6): 1085–1093. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2005.01042.x.
- MULLANEY, J., T. LUCKE & S. J. TRUEMAN (2015): A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. In: *Landscape and Urban Planning* 134: 157–166. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.013.
- MULLER, M. (2007): Adapting to climate change. Water management for urban resilience. In: *Environment and Urbanization* 19 (1): 99–113. DOI: 10.1177/0956247807076726.
- MÜLLER, N., W. KUTTLER & A.-B. BARLAG (2014): Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effect on thermal comfort. In: *Theoretical and Applied Climatology* 115 (1-2): 243–257. DOI: 10.1007/s00704-013-0890-4.
- NAWROTZKI, A. (2014): Zeitenräume. Kartografische Spaziergänge durch die Geschichte der Stadt Jena. Unter Mitarbeit von André Nawrotzki. 2., Aufl. Jena: Dominopius.
- NELSON, G. C., M. W. ROSEGRANT, J. KOO, R. ROBERTSON, T. SULSER, T. ZHU, C. RINGLER, S. MSANGI, A. PALAZZO, M. BATKA, M. MAGALHAES, R. VALMONTE-SANTOS, M. EWING & D. LEE (2009): Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation. Hg. v. International Food Policy Research Institute. Washington, D.C.
- NG, E. (2015): Issues of application - from urban climatic map to urban planning. In: NG, E. & C. REN (HG.): The urban climatic map. A methodology for sustainable urban planning: 429–453.
- NG, E., C. REN, L. KATZSCHNER & R. YAU (2009): Urban Climatic Studies for hot and humid tropical coastal city of Hong Kong. The 7th International Conference on Urban Climate. Yokohama, Japan, 29.06.2009.
- NVS (Nachbarschaftsverband Stuttgart) (Hg.) (1992): Klimauntersuchung für das Gebiet des Nachbarschaftsverbandes Stuttgart und angrenzende Teile der Region Stuttgart. Klimaatlas. Stuttgart.
- O'HARA, J. K. & K. P. GEORGAKAKOS (2008): Quantifying the Urban Water Supply Impacts of Climate Change. In: *Water Resources Management* 22 (10): 1477–1497. DOI: 10.1007/s11269-008-9238-8.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2008): Handbook on constructing composite indicators. Methodology and user guide. Paris: OECD.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2010): Cities and climate change. Paris: OECD.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2014): Cities and Climate Change. National governments enabling local action (Policy Perspectives).
- OERKE, E.-C. (2006): Crop losses to pests. In: *The Journal of Agricultural Science* 144 (01): 31–43. DOI: 10.1017/S0021859605005708.
- OGAWA-ONISHI, Y., P. M. BERRY & N. TANAKA (2010): Assessing the potential impacts of climate change and their conservation implications in Japan: A case study of conifers. In: *Conservation planning within emerging global climate and economic realities* 143 (7): 1728–1736. DOI: 10.1016/j.biocon.2010.04.021.
- OKE, T. R. (1973): City size and the urban heat island. In: *Atmospheric Environment* (1967) 7 (8): 769–779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6.
- OKE, T. R. (1976): The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. In: *Atmosphere* 14 (4): 268–277.
- OKE, T. R. (1978): Boundary layer climates. London [u.a.]: Routledge.
- OKE, T. R. (1981): Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. In: *Journal of Climatology* 1 (3): 237–254. DOI: 10.1002/joc.3370010304.

- OKE, T. R. (1984): Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. In: *Energy and Buildings* 7 (1): 1–10. DOI: 10.1016/0378-7788(84)90040-9.
- OKE, T. R. (2006a): Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Hg. v. World Meteorological Organization (WMO) (Instruments and observing methods, 81).
- OKE, T. R. (2006b): Towards better scientific communication in urban climate. In: *Theoretical and Applied Climatology* 84 (1-3): 179–190. DOI: 10.1007/s00704-005-0153-0.
- OSBORNE, T., G. ROSE & T. WHEELER (2013): Variation in the global-scale impacts of climate change on crop productivity due to climate model uncertainty and adaptation. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 183–194. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.07.006.
- OVERBECK, G. & E. FRANCK (2012): Raumplanerische Strategien vor dem Hintergrund des Klimawandels. In: BIRKMANN, J. (HG.): Anpassung an den Klimawandel durch räumliche Planung. Grundlagen, Strategien, Instrumente. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (E-paper der ARL, Nr. 13): 89–105.
- OW, L. F., T. Y. YEO & E. K. SIM (2011): Identification of drought-tolerant plants for roadside greening—An evaluation of chlorophyll fluorescence as an indicator to screen for drought tolerance. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 10 (3): 177–184. DOI: 10.1016/j.ufug.2011.03.001.
- PALIN, E. J., H. E. THORNTON, C. T. MATHISON, R. E. MCCARTHY, R. T. CLARK & J. DORA (2013): Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain. In: *Climatic Change* 120 (1-2): 71–93. DOI: 10.1007/s10584-013-0810-8.
- PARENT, M. B. & D. VERBYLA (2010): The Browning of Alaska's Boreal Forest. In: *Remote Sensing* 2 (12): 2729–2747. DOI: 10.3390/rs2122729.
- PARLOW, E. (2003): The urban heat budget derived from satellite data. In: *Geographica Helvetica* 58 (2): 99–111. DOI: 10.5194/gh-58-99-2003.
- PARLOW, E., D. SCHERER & U. FEHRENBACH (2006): Regionale Klimaanalyse der Region Südlicher Oberrhein (REKLISO). Wissenschaftlicher Abschlussbericht. Hg. v. Regionalverband Südlicher Oberrhein. Freiburg im Breisgau.
- PARLOW, E., D. SCHERER & U. FEHRENBACH (2010): Klimaanalyse der Stadt Zürich (KLAZ). Wissenschaftlicher Bericht. Hg. v. Umwelt- und Gesundheitsschutz der Stadt Zürich. Zürich.
- PASZYNSKI, J. (1991): Mapping urban topoclimates. In: *Energy and Buildings* 16 (3–4): 1059–1062. DOI: 10.1016/0378-7788(91)90099-O.
- PAUSAS, J. G. & S. FERNÁNDEZ-MUÑOZ (2012): Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. In: *Climatic Change* 110 (1-2): 215–226. DOI: 10.1007/s10584-011-0060-6.
- PEARSON, R. G., S. J. PHILLIPS, M. M. LORANTY, P. S. A. BECK, T. DAMOULAS, S. J. KNIGHT & S. J. GOETZ (2013): Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. In: *Nature Climate Change* 3 (7): 673–677. DOI: 10.1038/nclimate1858.
- PENG, S., J. HUANG, J. E. SHEEHY, R. C. LAZA, R. M. VISPERAS, X. ZHONG, G. S. CENTENO, G. S. KHUSH & K. G. CASSMAN (2004): Rice yields decline with higher night temperature from global warming. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101 (27): 9971–9975. DOI: 10.1073/pnas.0403720101.
- PETERSEN, M. S. (2001): Impacts of Flash Floods. In: GRUNTFEST, E. & J. HANDMER (HG.): Coping with Flash Floods. Dordrecht: Springer Netherlands (NATO Science Partnership Sub-Series: 2., 1389-1839, 77): 11–13. Online verfügbar unter [http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-94-010-0918-8\\_2.pdf](http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-94-010-0918-8_2.pdf).
- PORTER, J. R. & M. GAWITH (1999): Temperatures and the growth and development of wheat: a review. In: *European Journal of Agronomy* 10 (1): 23–36. DOI: 10.1016/S1161-0301(98)00047-1.
- PORTER, T. J. & M. F. J. PISARIC (2011): Temperature-growth divergence in white spruce forests of Old Crow Flats, Yukon Territory, and adjacent regions of northwestern North America. In: *Global Change Biology* 17 (11): 3418–3430. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02507.x.
- POTOPOVÁ, V., P. ZAHRADNÍČEK, L. TÜRKÖTT, P. ŠTĚPÁNEK & J. SOUKUP (2015): The Effects of Climate Change on Variability of the Growing Seasons in the Elbe River Lowland, Czech Republic. In: *Advances in Meteorology* 2015 (3): 1–16. DOI: 10.1155/2015/546920.

- PRASKIEVICZ, S. & H. CHANG (2009): A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. In: *Progress in Physical Geography* 33 (5): 650–671. DOI: 10.1177/0309133309348098.
- PREETZ, H. (2003): Bewertung von Bodenfunktionen für die praktische Umsetzung des Bodenschutzes (dargestellt am Beispiel eines Untersuchungsgebiets in Sachsen-Anhalt). Dissertation. Halle.
- PROWSE, T. D., C. FURGAL, R. CHOUINARD, H. MELLING, D. MILBURN & S. L. SMITH (2009): Implications of climate change for economic development in northern Canada: energy, resource, and transportation sectors. In: *Ambio* 38 (5): 272–281.
- PTAK, D., E. GROTHUES, B. KÖLLNER, G. HALBIG, T. KESSELER-LAUTERKORN, C. DALELANE, T. DEUTSCHLÄNDER, H. ERTEL, M. HAFFER, C. KOCH, M. KOBMANN, G. MALITZ, O. ROLL, A. SCHMITT, E. WEIGL, T. WINTERRATH, C. HARTWIG, Y. WIECZORREK, F. RÜSING & I. SCHWERDORF (2013): Klimawandel-gerechte Metropole Köln. Abschlussbericht. Hg. v. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen (LANUV-Fachbericht, 50).
- RADHI, H. (2009): Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings – A contribution to reduce the CO<sub>2</sub> emissions. In: *Building and Environment* 44 (12): 2451–2462. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.04.006.
- RAHMAN, M. M., G. HAUGHTON & A. E. G. JONAS (2010): The challenges of local environmental problems facing the urban poor in Chittagong, Bangladesh. A scale-sensitive analysis. In: *Environment and Urbanization* 22 (2): 561–578. DOI: 10.1177/0956247810377560.
- RANNO, S., W. LOIBL, S. GREIVING, D. GRUEHN & B. C. MEYER (2010): Potential impacts of climate change in Germany—Identifying regional priorities for adaptation activities in spatial planning. In: *Climate Change and Spatial Planning* 98 (3–4): 160–171. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.08.017.
- RAU, D., H. SCHRAMM & J. WUNDERLICH (2000): Die Leitbodenformen Thüringens. In: *Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, Beiheft* (3).
- RBD (Regierung der Bundesrepublik Deutschland) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Berlin.
- REID, C. E., M. S. O'NEILL, C. J. GRONLUND, S. J. BRINES, D. G. BROWN, A. V. DIEZ-ROUX & J. SCHWARTZ (2009): Mapping community determinants of heat vulnerability. In: *Environmental health perspectives* 117 (11): 1730–1736. DOI: 10.1289/ehp.0900683.
- REN, C. (2015): A review of the historical development of urban climatic map study. In: NG, E. & C. REN (HG.): The urban climatic map. A methodology for sustainable urban planning: 10–34.
- RENDENBACH, A., T. KRAUSE & D. TÖRKEL (2014): Zukunftsbaumliste Düsseldorf. Hg. v. Landeshauptstadt Düsseldorf, Garten-, Friedhofs- und Forstamt. Düsseldorf.
- REUTER, U. & R. KAPP (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung. 2. Aufl. Hg. v. Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI-BW). Stuttgart.
- REVI, A. (2005): Lessons from the deluge: priorities for multi-hazard risk mitigation. In: *Economic and political weekly* 40 (36): 3911–3916. DOI: 10.2307/4417103.
- RIEDEL, G. (2004): Ein hydrologisches Modell für tidebeeinflusste Flussgebiete. Dissertation. Braunschweig.
- RKK (REGKLAM-Konsortium) (2013): Integriertes regionales Klimaanpassungsprogramm für die Region Dresden. Grundlagen, Ziele und Maßnahmen. Berlin: Rhombos (REGKLAM-Publikationsreihe, 7).
- ROBINE, J.-M., (Cheung, Siu Lan K), S. LE ROY, H. VAN OYEN, C. GRIFFITHS, J.-P. MICHEL & F. R. HERRMANN (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. In: *Comptes rendus biologies* 331 (2): 171–178. DOI: 10.1016/j.crv.2007.12.001.
- RODDA, J. C., M. A. LITTLE, H. J. E. RODDA & P. E. MCSHARRY (2009): A Comparative Study of the Magnitude, Frequency and Distribution of Intense Rainfall in the United Kingdom: Nature Publishing Group. Online verfügbar unter <http://precedings.nature.com/documents/3847/version/1/files/npre20093847-1.pdf>.
- ROLAND, A., R. RAUSCH, T. HUXHORN, T. KRAUS, S. WALLISCH, M.-D. SIKIRIC, Y.-J. ZHANG & U. ZANKE (2015): Hochauflösende Simulation von urbanen Sturzfluten. Anwendungsbeispiel: Überflutungsprüfung für die Stadt Worms. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 62 (3): 215–224.
- ROLOFF, A. (2013): Bäume in der Stadt. Stuttgart: Ulmer.

- ROLOFF, A., S. GILLNER & S. BONN (2008): Gehölzartenwahl im urbanen Raum unter dem Aspekt des Klimawandels. Vorstellung der KLimaArtenMatrix für Stadtbaumarten (KLAM-Stadt). In: BDB (Bund deutscher Baumschulen) (Hg.): Klimawandel und Gehölze. Pinneberg (Sonderheft Grün ist Leben): 30–42.
- ROLOFF, A. & B. GRUNDMANN (2008): Waldbaumarten und ihre Verwendung im Klimawandel. In: *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie* 42 (3): 97–109.
- ROLOFF, A., S. KORN & S. GILLNER (2009): The Climate-Species-Matrix to select tree species for urban habitats considering climate change. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 8 (4): 295–308. DOI: 10.1016/j.ufug.2009.08.002.
- ROLOFF, A. & M. MEYER (2008): Eignung der heimischen und möglicher nichtheimischer Gehölze in der Landschaft und Konsequenzen für die Verwendung. Auswirkungen des zu erwartenden Klimawandels. In: BDB (Bund deutscher Baumschulen) (Hg.): Klimawandel und Gehölze. Pinneberg (Sonderheft Grün ist Leben): 4–29.
- ROMERO LANKAO, P. (2010): Water in Mexico City. What will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities? In: *Environment and Urbanization* 22 (1): 157–178. DOI: 10.1177/0956247809362636.
- ROSENZWEIG, C., J. ELLIOTT, D. DERYNG, A. C. RUANE, C. MÜLLER, A. ARNETH, K. J. BOOTE, C. FOLBERTH, M. GLOTTER, N. KHABAROV, K. NEUMANN, F. PIONTEK, T. A. M. PUGH, E. SCHMID, E. STEHFEST, H. YANG & J. W. JONES (2014): Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (9): 3268–3273. DOI: 10.1073/pnas.1222463110.
- ROSENZWEIG, C., J. W. JONES, J. L. HATFIELD, A. C. RUANE, K. J. BOOTE, P. THORBURN, J. M. ANTLE, G. C. NELSON, C. PORTER, S. JANSSEN, S. ASSENG, B. BASSO, F. EWERT, D. WALLACH, G. BAIGORRIA & J. M. WINTER (2013): The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP). Protocols and pilot studies. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 166–182. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.09.011.
- ROSENZWEIG, C., W. SOLECKI, P. ROMERO-LANKAO, S. MEHROTRA, S. DHAKAL & (Bowman, T. Ali-Ibrahim, S.) (2015): Climate Change and Cities. Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network. ARC3.2 Summary for City Leaders.
- ROSENZWEIG, C., W. D. SOLECKI, S. A. HAMMER & S. MEHROTRA (2011): Climate change and cities. First Assessment Report (ARC3) of the Urban Climate Change Research Network (UCCRN). Cambridge, UK, New York: Cambridge University Press; Center for Climate Systems Research, Earth Institute, Columbia University.
- ROY, S. B., L. CHEN, E. H. GIRVETZ, E. P. MAURER, W. B. MILLS & T. M. GRIEB (2012): Projecting Water Withdrawal and Supply for Future Decades in the U.S. under Climate Change Scenarios. In: *Environmental Science & Technology* 46 (5): 2545–2556. DOI: 10.1021/es2030774.
- RPD-AAU (Regierungspräsidium Darmstadt, Abteilung Arbeitsschutz und Umwelt) (2012): Hochwasserrisikomanagementplan für das Gewässersystem Mümling. Darmstadt.
- SAATCHI, S., S. ASEFI-NAJAFABADY, Y. MALHI, L. E. O. C. ARAGÃO, L. O. ANDERSON, R. B. MYNENI & R. NEMANI (2013): Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (2): 565–570. DOI: 10.1073/pnas.1204651110.
- SÆBØ, A., T. BENEDIKZ & T. B. RANDRUP (2003): Selection of trees for urban forestry in the Nordic countries. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 2 (2): 101–114. DOI: 10.1078/1618-8667-00027.
- SÆBØ, A., Ž. BORZAN, C. DUCATILLION, A. HATZISTATHIS, T. LAGERSTRÖM, J. SUPUKA, J. L. GARCÍA-VALDECANTOS, F. REGO & J. VAN SLYCKEN (2005): The Selection of Plant Materials for Street Trees, Park Trees and Urban Woodland. In: KONIJNENDIJK, C. C. (Hg.): Urban forests and trees. A reference book. Berlin, New York: Springer. Online verfügbar unter [http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-27684-X\\_11.pdf](http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-27684-X_11.pdf).
- SANTER, B. D., C. MEARS, F. J. WENTZ, K. E. TAYLOR, P. J. GLECKLER, T. M. L. WIGLEY, T. P. BARNETT, J. S. BOYLE, W. BRUGGEMANN, N. P. GILLET, S. A. KLEIN, G. A. MEEHL, T. NOZAWA, D. W. PIERCE, P. A. STOTT, W. M. WASHINGTON & M. F. WEHNER (2007): Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104 (39): 15248–15253. DOI: 10.1073/pnas.0702872104.

- SATTERTHWAITE, D., G. MCGRANAHAN & C. TACOLI (2010): Urbanization and its implications for food and farming. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365 (1554): 2809–2820. DOI: 10.1098/rstb.2010.0136.
- SBA (Statistisches Bundesamt) (2015a): Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Hg. v. Statistisches Bundesamt (SBA). Statistisches Bundesamt (SBA). Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204159004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204159004.pdf?__blob=publicationFile).
- SBA (Statistisches Bundesamt) (2015b): Bodenfläche (tatsächliche Nutzung): Deutschland, Stichtag, Nutzungsarten. Hg. v. Statistisches Bundesamt (SBA). Wiesbaden. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data>, zuletzt geprüft am 02.05.2015.
- SBA (Statistisches Bundesamt) (2015c): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Umweltökonomische Gesamtrechnungen Nachhaltige Entwicklung in Deutschland: Indikatoren zu Umwelt und Ökonomie. Hg. v. Statistisches Bundesamt (SBA). Wiesbaden.
- SCHAEFFER, R., A. S. SZKLO, (Pereira de Lucena, André Frossard), (Moreira Cesar Borba, Bruno Soares), L. P. PUPO NOGUEIRA, F. P. FLEMING, A. TROCCOLI, M. HARRISON & M. S. BOULAHYA (2012): Energy sector vulnerability to climate change. A review. In: *Energy* 38 (1): 1–12. DOI: 10.1016/j.energy.2011.11.056.
- SCHAFLEITNER, R., J. RAMIREZ, A. JARVIS, D. EVERS, R. GUTIERREZ & M. SCURRAH (2011): Adaptation of the Potato Crop to Changing Climates. In: YADAV, S. S., R. J. REDDEN, J. L. HATFIELD, H. LOTZE-CAMPEN & A. E. HALL (HG.): *Crop Adaptation to Climate Change*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell: 287–297. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470960929.ch20/pdf>.
- SCHALLER, M., S. SCHRADER & H.-J. WEIGEL (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Braunschweig: Bundesforschungsanst. für Landwirtschaft (FAL) (Landbauforschung Völknerode Sonderheft, 316).
- SCHAEFFER, F., P. SCHACHTSCHABEL & H.-P. BLUME (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- SCHAEFFLER, A. & M. FRÜHAUF (2011): Veränderungen der Pflanzenphänologie in unterschiedlichen Naturräumen Sachsen-Anhalts unter Berücksichtigung ihrer wesentlichen Einflussfaktoren. In: *Hercynia N. F.* 44 (2): 169–189.
- SCHEID, C. (2014): Starkregen und urbane Sturzfluten. Risiken erkennen und Überflutungsvorsorge treffen auf kommunaler und objektbezogener Ebene. 29. DWA-Erfahrungsaustausch zur Abwasserbeseitigung, SGD-Nord. Irrel, 11.03.2014.
- SCHEID, C., T. G. SCHMITT, G. BISCHOFF, N. HÜFFMEYER, K. KRIEGER, A. WALDHOFF & C. GÜNNER (2013): GIS-based methodology for pluvial flood risk analysis in Hamburg. In: 8th international conference on planning & technologies for sustainable urban water management. Novatech. Lyon, 23.-27.06.2013.
- SCHERBER, K., M. LANGNER & W. R. ENDLICHER (2013): Spatial analysis of hospital admissions for respiratory diseases during summer months in Berlin taking bioclimatic and socio-economic aspects into account. In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 144 (3-4): 217–237.
- SCHERER, D. & W. R. ENDLICHER (2013): Editorial: Urban climate and heat stress – Part 1. In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 144 (3-4): 175–180.
- SCHERER, D., U. FEHRENBACH, H.-D. BEHA & E. PARLOW (1999): Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. In: *Atmospheric Environment* 33 (24-25): 4185–4193. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00161-2.
- SCHERER, D., U. FEHRENBACH, T. LAKES, S. LAUF, F. MEIER & C. SCHUSTER (2013): Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. In: *Die Erde : journal of the Geographical Society of Berlin ; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 144 (3-4): 238–259.
- SCHERER, D., U. FEHRENBACH & E. PARLOW (2000): Climate Analysis Maps for Planning Aspects of Solothurn/CH. Final Report (Phase 1 and 2) mit beiliegender CD-Rom des ESA Forschungs- und Anwendungsprojekts CAMPAS-CH. Universität Basel. Basel (MCR Lab).
- SCHERER, D., U. FEHRENBACH, E. PARLOW & H.-D. BEHA (1997): *Klimaanalyse der Region Basel*. Technischer Bericht des Forschungs- und Anwendungsprojekts KABA. Universität Basel. Basel (MCR Lab).

- SCHLENKER, W. & M. J. ROBERTS (2009): Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (37): 15594–15598. DOI: 10.1073/pnas.0906865106.
- SCHLIPF, S., L. HERLITZIUS & B. FROMMER (2008): Regionale Steuerungspotenziale zur Anpassung an den Klimawandel – Möglichkeiten und Grenzen formeller und informeller Planung. In: *RaumPlanung* (137): 77–82.
- SCHMIDL, J. & C. FREI (2005): Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. In: *International Journal of Climatology* 25 (6): 753–771. DOI: 10.1002/joc.1179.
- SCHMIDT, C., A. SEIDEL, J. KOŁODZIEJ, A. BERKNER, K. KLAMA, M. FRIEDRICH, M. SCHOTTKE & S. CHMIELSKI (2011): Vulnerabilitätsanalyse Westsachsen. Hg. v. Regionaler Planungsverband Leipzig-Westsachsen (RPV-LW). TU Dresden, Lehr- und Forschungsgebiet Landschaftsplanung. Leipzig, Dresden.
- SCHMIDT, D. (2016): Inhalte und Bearbeitungsstand der Fachkarte Klimaanpassung Hannover, 05.10.2016. telefonisch an Uwe Kurmutz.
- SCHMIDT-THOMÉ, P. & S. GREIVING (2013): European climate vulnerabilities and adaptation. A spatial planning perspective. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons Inc.
- SCHÖNTHALER, C., S. von ANDRIAN-WERBURG, P. von RÜTH & S. HEMPEN (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau.
- SCHÜTZ, M. (1995): Anthropogene Niederschlagsmodifikationen imkomplex-urbanen Raum am Beispiel des Ruhrgebiets. Essen (Dissertation).
- SEIDL, R., M.-J. SCHELHAAS, M. LINDNER & M. J. LEXER (2008): Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. In: *Regional Environmental Change* 9 (2): 101–119. DOI: 10.1007/s10113-008-0068-2.
- SHIOGAMA, H., S. EMORI, N. HANASAKI, M. ABE, Y. MASUTOMI, K. TAKAHASHI & T. NOZAWA (2011): Observational constraints indicate risk of drying in the Amazon basin. In: *Nature Communications* 2: 253. DOI: 10.1038/ncomms1252.
- SIEGHARDT, M., E. MURSCH-RADLGRUBER, E. PAOLETTI, E. COUENBERG, A. DIMITRAKOPOULOS, F. REGO, A. HATZISTATHIS & T. B. RANDRUP (2005): The Abiotic Urban Environment: Impact of Urban Growing Conditions on Urban Vegetation. In: KONJUNENDIJK, C. C. (HG.): Urban forests and trees. A reference book. Berlin, New York: Springer. Online verfügbar unter [http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-27684-X\\_12.pdf](http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F3-540-27684-X_12.pdf).
- SIEVERS, U. (2012): Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO\_3. Offenbach am Main: Selbstverl. des Dt. Wetterdienstes (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 240).
- SJÖMAN, H., A. D. HIRONS & N. L. BASSUK (2015): Urban forest resilience through tree selection—Variation in drought tolerance in *Acer*. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 14 (4): 858–865. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.08.004.
- SJÖMAN, H. & A. B. NIELSEN (2010): Selecting trees for urban paved sites in Scandinavia – A review of information on stress tolerance and its relation to the requirements of tree planners. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 9 (4): 281–293. DOI: 10.1016/j.ufug.2010.04.001.
- SMITH, B. J., M. GOMEZ-HERAS & S. MCCABE (2008): Understanding the decay of stone-built cultural heritage. In: *Progress in Physical Geography* 32 (4): 439–461. DOI: 10.1177/0309133308098119.
- SODOUDI, S., P. SHAHMOHAMADI, K. VOLLACK, U. CUBASCH & A. I. CHE-ANI (2014): Mitigating the Urban Heat Island Effect in Megacity Tehran. In: *Advances in Meteorology* 2014 (3-4): 1–19. DOI: 10.1155/2014/547974.
- SPELLMANN, H., M. ALBERT, M. SCHMIDT, J. SUTMÖLLER & M. OVERBECK (2011): Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. In: *AFZ - Der Wald* (11): 19–23.
- SPEROTTO, A., S. TORRESAN, V. GALLINA, E. COPPOLA, A. CRITTO & A. MARCOMINI (2016): A multi-disciplinary approach to evaluate pluvial floods risk under changing climate: The case study of the municipality of Venice (Italy). In: *Science of The Total Environment* 562: 1031–1043. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.150.
- STEINRÜCKE, M., U. EIMER, J. EGGENSTEIN, A. BAUMEISTER, D. AHLEMANN & M. RICK (2013): Klimaanpassungskonzept Bochum. Hg. v. Stadt Bochum. Bochum.

- STEINRÜCKE, M., U. EIMER, G. LOOS, V. BARTOLOVIC, D. AHLEMANN, S. SCHRÖDTER & J. EGGENSTEIN (2016): Klimaanpassungskonzept der Stadt Emmerich am Rhein. Bochum.
- STEINRÜCKE, M., A. SNOWDON, W. KUTTLER, D. DÜTEMAYER, A.-B. BARLAG, J. HASSE, C. RÖSLER & V. LORKE (2010): Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Langfassung. Hg. v. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV-NRW).
- STERN, N. H. (2007): The economics of climate change. The Stern review. Cambridge, UK, New York: Cambridge University Press.
- STERTEN, A. K. (1982): A thematic mapping system and a description of local climatic conditions developed for urban planning purposes. In: *Energy and Buildings* 4 (2): 121–124. DOI: 10.1016/0378-7788(82)90036-6.
- STEWART, I. D. & T. R. OKE (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 93 (12): 1879–1900. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- STEWART, M. G., X. WANG & M. N. NGUYEN (2011): Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration. In: *Engineering Structures* 33 (4): 1326–1337. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.010.
- STHA (Stadt Hannover) (Hg.) (2012): Anpassungsstrategie zum Klimawandel. Informationen zu den Folgen des Klimawandels für die Stadt Hannover und die daraus resultierenden notwendigen Anpassungsmaßnahmen. Hannover.
- STJE (Stadt Jena) (Hg.) (2016a): Kindertagesstätten in Jena. Online verfügbar unter <http://www.jena.de/de/220978#/?page=1>, zuletzt geprüft am 12.10.2016.
- STJE (Stadt Jena) (Hg.) (2016b): Senioren- & Pflegeheime in Jena. Online verfügbar unter [http://www.jena.de/de/leben/jena\\_fuer/senioren/heime/229709#/?page=1](http://www.jena.de/de/leben/jena_fuer/senioren/heime/229709#/?page=1), zuletzt geprüft am 12.10.2016.
- STJE (Stadt Jena) (Hg.) (2016c): Zeitreihen von statistischen Größen für je eine Größe über alle Stadtbezirke. Online verfügbar unter <http://www.jena.de/statistik/abruf/ot-df.php>, zuletzt geprüft am 05.04.2016.
- STOCK, P. & W. BECKRÖGE (1985): Klimaanalyse der Stadt Essen. Essen (Planungshefte Ruhrgebiet, 15).
- STOCK, P., W. BECKRÖGE, O. KIESE, W. KUTTLER & H. LÜFTNER (1986): Klimaanalyse der Stadt Dortmund. Essen (Planungshefte Ruhrgebiet, 18).
- STOCKMANN, U., B. MINASNY & A. B. MCBRATNEY (2014): How fast does soil grow? In: *Geoderma* 216: 48–61. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.10.007.
- STORCH, H. V. & M. CLAUSSEN (2011): Klimabericht für die Metropolregion Hamburg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- SUKOPP, H. & A. WURZEL (2003): The Effects of Climate Change on the Vegetation of Central European Cities. In: *Urban Habitats* 1 (1): 66–86.
- SUN, S., G. SUN, P. CALDWELL, S. McNULTY, E. COHEN, J. XIAO & Y. ZHANG (2015): Drought impacts on ecosystem functions of the U.S. National Forests and Grasslands: Part II assessment results and management implications. In: *Forest Ecology and Management* 353: 269–279. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.04.002.
- SUNDBORG, Å. (1950): Local Climatological Studies of the Temperature Conditions in an Urban Area. In: *Tellus* 2 (3): 222–232. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1950.tb00333.x.
- SUPIT, I., C. A. VAN DIEPEN, A. de WIT, J. WOLF, P. KABAT, B. BARUTH & F. LUDWIG (2012): Assessing climate change effects on European crop yields using the Crop Growth Monitoring System and a weather generator. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 164: 96–111. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.05.005.
- SUŠNIK, J., C. STREHL, L. A. POSTMES, L. S. VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, D. A. Savić, Z. KAPELAN & H.-J. MÄLZER (2014): Assessment of the Effectiveness of a Risk-reduction Measure on Pluvial Flooding and Economic Loss in Eindhoven, the Netherlands. In: *Procedia Engineering* 70: 1619–1628. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.179.
- SWOCZYNA, T., H. M. KALAJI, S. PIETKIEWICZ & J. BOROWSKI (2015): Ability of various tree species to acclimation in urban environments probed with the JIP-test. In: *Urban Forestry & Urban Greening* 14 (3): 544–553. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.05.005.
- SZÜCS, Á. (2013): Wind comfort in a public urban space—Case study within Dublin Docklands. In: *Frontiers of Architectural Research* 2 (1): 50–66. DOI: 10.1016/j.foar.2012.12.002.



- TAGARIS, E., K.-J. LIAO, A. J. DELUCIA, L. DECK, P. AMAR & A. G. RUSSELL (2009): Potential Impact of Climate Change on Air Pollution-Related Human Health Effects. In: *Environmental Science & Technology* 43 (13): 4979–4988. DOI: 10.1021/es803650w.
- TALEGHANI, M., L. KLEEREKOPER, M. TENPIERIK & (van den Dobbelsteen, Andy) (2015): Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. In: *Building and Environment* 83: 65–78. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.014.
- TATE, E. (2012): Social vulnerability indices: a comparative assessment using uncertainty and sensitivity analysis. In: *Natural Hazards* 63 (2): 325–347.
- TATE, E. (2013): Uncertainty Analysis for a Social Vulnerability Index. In: *Annals of the Association of American Geographers* 103 (3): 526–543.
- TATE, E., S. L. CUTTER & M. BERRY (2010): Integrated multihazard mapping. In: *Environment and Planning B: Planning and Design* 37 (4): 646–663. DOI: 10.1068/b35157.
- TAYLOR, C. A. & H. G. STEFAN (2009): Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. In: *Journal of Hydrology* 375 (3–4): 601–612. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.009.
- TEIXEIRA, E. I., G. FISCHER, H. VAN VELTHUIZEN, C. WALTER & F. EWERT (2013): Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 206–215. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.09.002.
- TERJUNG, W. H. (1970): Urban Energy Balance Climatology: A Preliminary Investigation of the City-Man System in Downtown Los Angeles. In: *Geographical Review* 60 (1): 31. DOI: 10.2307/213343.
- THORNBUSH, M. J. & H. A. VILES (2007): Simulation of the dissolution of weathered versus unweathered limestone in carbonic acid solutions of varying strength. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (6): 841–852. DOI: 10.1002/esp.1441.
- TIDWELL, V. C., P. H. KOBOS, L. A. MALCZYNSKI, G. KLISE & C. R. CASTILLO (2012): Exploring the Water-Thermoelectric Power Nexus. In: *Journal of Water Resources Planning and Management* 138 (5): 491–501. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000222.
- TKA (Thüringer Klimaagentur) (2015): Konvektives Unwetterpotenzial in Thüringen. Hg. v. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG). Jena. Online verfügbar unter <http://thueringen.de/th8/klimaagentur/data/unwetterpotential>, zuletzt geprüft am 18.06.2016.
- TLS (Thüringer Landesamt für Statistik) (Hg.) (2010): Voraussichtliche Bevölkerungsentwicklung nach Prognosejahren in Thüringen. Ergebnisse der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung (KBV). Online verfügbar unter <http://www.statistik.thueringen.de/datenbank/TabAnzeige.asp?tabelle=zr000113>||, zuletzt geprüft am 01.05.2015.
- TLS (Thüringer Landesamt für Statistik) (Hg.) (2014): Voraussichtliche Bevölkerung 2014, 2025 und 2035 nach ausgewählten Altersgruppen und Kreisen (am 31.12. des jeweiligen Jahres) in Thüringen. Ergebnisse der 1. regionalisierten Bevölkerungsvorausberechnung (rBv). Online verfügbar unter <http://www.statistik.thueringen.de/datenbank/TabAnzeige.asp?tabelle=kz000123>||, zuletzt geprüft am 03.05.2016.
- TLS (Thüringer Landesamt für Statistik) (Hg.) (2015): Siedlungs- und Verkehrsfläche nach Nutzungsarten und Kreisen in Thüringen. Online verfügbar unter <http://www.statistik.thueringen.de/datenbank/TabAnzeige.asp?tabelle=kr000534>, zuletzt geprüft am 02.07.2016.
- TLS (Thüringer Landesamt für Statistik) (Hg.) (2016): Flächen nach Art der tatsächlichen Nutzung nach Kreisen in Thüringen zum 31.12.2014. Online verfügbar unter <http://www.statistik.thueringen.de/datenbank/TabAnzeige.asp?tabelle=kr000504>||, zuletzt geprüft am 05.04.2016.
- TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie) (2001): Luftreinhalteplan Jena und südliches Umland. Hg. v. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (TMLNU). Jena.
- TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie) (Hg.) (2009): Anforderungen an Hydrologische Gutachten.
- TLUG (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie) (Hg.) (2011): Daten zur Einschätzung der Erosionsgefährdung. Unter Mitarbeit von Ralf Bischoff. Referat 64 Bodenkunde, Bodenschutz, Altlasten. Weimar.

- TLWF (Thüringer Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft) (2002): Standortseinheiten. Erläuterungen, Signierziffern und Symbole. Gotha.
- TMLFUN (Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz) (Hg.) (2013): Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen (IMPAKT). Erfurt.
- TOMASSINI, L. & D. JACOB (2009): Spatial analysis of trends in extreme precipitation events in high-resolution climate model results and observations for Germany. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114 (D12). DOI: 10.1029/2008JD010652.
- TRNKA, M., J. E. OLESEN, K. C. KERSEBAUM, A. O. SKJELVÅG, J. EITZINGER, B. SEGUIN, P. PELTONEN-SAINIO, R. RÖTTER, A. IGLESIAS, S. ORLANDINI, M. DUBROVSKÝ, P. HLAVINKA, J. BALEK, H. ECKERSTEN, E. CLOPPET, P. CALANCA, A. GOBIN, V. VUČETIĆ, P. NEJEDLIK, S. KUMAR, B. LALIC, A. MESTRE, F. ROSSI, J. KOZYRA, V. ALEXANDROV, D. SEMERÁDOVÁ & Z. ŽALUD (2011): Agroclimatic conditions in Europe under climate change. In: *Global Change Biology* 17 (7): 2298–2318. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x.
- TUBBY, K. V. & J. F. WEBBER (2010): Pests and diseases threatening urban trees under a changing climate. In: *Forestry* 83 (4): 451–459. DOI: 10.1093/forestry/cpq027.
- TUD-FB (TU Dresden, Professur für Forstbotanik) (2016): citree: Gehölze für urbane Räume. Planungsdatenbank. Hg. v. Technische Universität Dresden (TUD). Dresden. Online verfügbar unter <http://citree.ddns.net/>, zuletzt geprüft am 24.05.2016.
- TYRNA, B. (2007): Entwicklung und Erprobung eines GIS-gestützten Starkregen-Abflussmodells zur Gefahrenanalyse von urbanen Sturzfluten. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Geographie.
- TYRNA, B. & V. HOCHSCHILD (2010a): Urban flash flood modelling based on soil sealing information derived from high resolution satellite data. Conference Paper. HydroPredict Conference. Prag.
- TYRNA, B. G. & V. HOCHSCHILD (2010b): Modellierung von lokalen Überschwemmungen nach Starkniederschlägen. In: STROBL, J. (Hg.): Angewandte Geoinformatik 2010. Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg. Berlin: Wichmann: 325–334.
- UASN (Umweltamt der Stadt Nürnberg) (Hg.) (2012): Handbuch Klimaanpassung. Bausteine für die Nürnberger Anpassungsstrategie. Nürnberg.
- UBA (Umweltbundesamt) (Hg.) (2016): KomPass-Tatenbank. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank>, zuletzt geprüft am 13.19.2016.
- UFEI (Urban Forest Ecosystems Institute) (2016): SelecTree: a tree selection guide. Hg. v. California Polytechnic State University (Cal Poly). San Luis Obispo (CA). Online verfügbar unter <http://selectree.calpoly.edu/search-trees-by-characteristics>, zuletzt geprüft am 24.05.2016.
- UKJ (Universitätsklinikum Jena) (Hg.) (2016): Lageplan Universitätsklinikum Jena Standorte Stadtzentrum und Lobeda. Online verfügbar unter <http://www.uniklinikum-jena.de/Startseite/So+finden+Sie+uns.html>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2016.
- UNFAO (United Nations Food and Agriculture Organization) (2008): Climate change impacts on forest health. Unter Mitarbeit von B. Moore und Gillian Allard. Rom (Forest Health and Biosecurity Working Papers, 34E).
- UNFAO (United Nations Food and Agriculture Organization) (2016): Climate change and food security: risks and responses. Rome.
- UN-HABITAT (United Nations Human Settlements Programme) (Hg.) (2011): Cities and climate change. Global report on human settlements, 2011. London.
- USAID (United States Agency for International Development) (2014): Design and use of composite indices in assessments of climate change vulnerability and resilience. African and Latin American resilience to climate change (ARCC). Hg. v. United States Agency for International Development (USAID).
- USDA (United States Department of Agriculture) (1986): Urban hydrology for small watersheds. Washington, D.C. (Technical Release, 55).
- USDA (United States Department of Agriculture) (2010): National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. Chapter 15: Time of concentration. Washington, D.C.
- VAN DEN BESSELAAR, E. J. M. & A. M. G. KLEIN TANK (2012): Trends in European precipitation extremes over 1951–2010. In: *International Journal of Climatology* 33 (12): 2682–2689. DOI: 10.1002/joc.3619.

- VAN RUIJVEN, B. J., M. A. LEVY, A. AGRAWAL, F. BIERMANN, J. BIRKMANN, T. R. CARTER, K. L. EBI, M. GARSCHAGEN, B. JONES, R. JONES, E. KEMP-BENEDICT, M. KOK, K. KOK, M. C. LEMOS, P. L. LUCAS, B. ORLOVE, S. PACHAURI, T. M. PARRIS, A. PATWARDHAN, A. PETERSEN, B. L. PRESTON, J. RIBOT, D. S. ROTHMAN & V. J. SCHWEIZER (2014): Enhancing the relevance of Shared Socioeconomic Pathways for climate change impacts, adaptation and vulnerability research. In: *Climatic Change* 122 (3): 481–494. DOI: 10.1007/s10584-013-0931-0.
- VASCONCELOS, A. C. P. (2013): Wälder im Klimawandel - Grundlagen für Anpassungsoptionen in Rheinland-Pfalz. Göttingen: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek.
- VDI-KRL (Verein Deutscher Ingenieure - Kommission Reinhaltung der Luft) (2003): Umweltmeteorologie - Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI 3787 Blatt 1: Beuth Verlag.
- VDI-KRL (Verein Deutscher Ingenieure - Kommission Reinhaltung der Luft) (2008): Umweltmeteorologie - Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung. Teil I: Klima. VDI 3787 Blatt 2: Beuth Verlag.
- VINCENT, K. (2004): Creating an index of social vulnerability to climate change for Africa (Tyndall Centre Working Paper, 56).
- VISSER, F. (2009): The day roads became rivers: A GIS-based assessment of flash floods in Worcester. In: SAMUELS, P., S. HUNTINGTON, W. ALLSOP & J. HARROP (Hg.): Flood risk management. Research and practice. Leiden, the Netherlands: CRC Press/Balkema: 1617–1621.
- VLACHOKOSTAS, C., A. V. MICHAILIDOU, E. MATZIRIS, C. ACHILLAS & N. MOUSSIOPOULOS (2014): A multiple criteria decision-making approach to put forward tree species in urban environment. In: *Urban Climate* 10, Part 1: 105–118. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.10.003.
- VOGES, J. (1999): Empirisches Modell für die mittlere Maßstabsebene zur GIS-gestützten Bestimmung der Anbindung erosionsgefährdeter Ackerflächen an Fließgewässer.
- VOLCANI, A., A. KARNIELI & T. SVORAY (2005): The use of remote sensing and GIS for spatio-temporal analysis of the physiological state of a semi-arid forest with respect to drought years. In: *Forest Ecology and Management* 215 (1–3): 239–250. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.063.
- VORDERBRÜGGE, T., R. MILLER, M. PETER & S. SAUER (2004): Ableitung der nutzbaren Feldkapazität aus den Klassenzeichen der Bodenschätzung. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 104: 33–34.
- VRS (Verband Region Stuttgart) (Hg.) (2008): Klimaatlas Region Stuttgart. Unter Mitarbeit von Jürgen Baumüller, Ulrich Reuter, U. Hoffmann und H. Esswein. Stuttgart (Schriftenreihe Verband Region Stuttgart, 26).
- WAGNER, T. (1915): Das Klima von Jena. Dissertation. Jena.
- WALLBAUM, E. (1991): Ableitung von Informationen zur Bodenkartierung aus Ergebnissen der Reichsbodenschätzung. Dissertation.
- WALTHER, G.-R., A. ROQUES, P. E. HULME, M. SYKES, P. PYSEK, I. KUEHN, M. ZOBEL, S. BACHER, Z. BOTTA-DUKAT, H. BUGMANN, B. CZUCZ, J. DAUBER, T. HICKLER, V. JAROSIK, M. KENIS, S. KLOTZ, D. MINCHIN, M. MOORA, W. NENTWIG, J. OTT, V. E. PANOV, B. REINEKING, C. ROBINET, V. SEMENCHENKO, W. SOLARZ, W. THUILLER, M. VILA, K. VOHLAND & J. SETTELE (2009): Alien species in a warmer world: risks and opportunities. In: *Trends in Ecology & Evolution* 24 (12): 686–693.
- WAROUX, O. de (2011): Floods as Human Health Risks. In: NRIAGU, J. O. (Hg.): Encyclopedia of environmental health. Amsterdam, London: Elsevier Science: 744–755.
- WASSMANN, R., S. JAGADISH, S. HEUER, A. ISMAIL, E. REDONA, R. SERRAJ, R. K. SINGH, G. HOWELL, H. PATHAK & K. SUMFLETH (2009): Climate Change Affecting Rice Production: The Physiological and Agro-nomic Basis for Possible Adaptation Strategies. In: *Advances in Agronomy*, Volume 101: Academic Press: 59–122.
- WB (World Bank) (2008): World Development Report 2009: Reshaping Economic Geography. Washington, D.C: The World Bank.
- WB (World Bank) (2010): Cities and Climate Change: An urgent agenda. Washington, D.C.
- WEHMEYER, L. L., F. H. WEIRICH & T. F. CUFFNEY (2011): Effect of land cover change on runoff curve number estimation in Iowa, 1832–2001. In: *Ecohydrology* 4 (2): 315–321. DOI: 10.1002/eco.162.

- WEIS, M., S. SIEDENTOP, L. MINNICH, J. BAUMÜLLER, H. FLAIG, F. HAAKH, G. KAULE & U. REUTER (2011): Vulnerabilitätsbericht der Region Stuttgart. Hg. v. Verband Region Stuttgart (VRS). Universität Stuttgart, Institut für Raumordnung und Entwicklungsplanung. Stuttgart.
- WELCH, J. R., J. R. VINCENT, M. AUFFHAMMER, P. F. MOYA, A. DOBERMANN & D. DAWE (2010): Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (33): 14562–14567. DOI: 10.1073/pnas.1001222107.
- WELP, L. R., J. T. RANDERSON & H. P. LIU (2007): The sensitivity of carbon fluxes to spring warming and summer drought depends on plant functional type in boreal forest ecosystems. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 147 (3–4): 172–185. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.07.010.
- WELSCH, J. (2015): Urban climatic map studies in Germany: Berlin. In: NG, E. & C. REN (HG.): The urban climatic map. A methodology for sustainable urban planning: 164–184.
- WIENERT, U. (2002): Untersuchungen zur Breiten- und Klimazonenabhängigkeit der urbanen Wärmeinsel. Eine statistische Analyse. Hohenwarsleben: Westarp Wiss (Essener Ökologische Schriften, 16).
- WILLEMS, P., K. ARNBJERG-NIELSEN, J. OLSSON & V. NGUYEN (2012): Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. In: *Atmospheric Research* 103: 106–118. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.04.003.
- WILLEMS, P. J. (2012): Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems. London: IWA. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=605183>.
- WILLETT, K. M., N. P. GILLET, P. D. JONES & P. W. THORNE (2007): Attribution of observed surface humidity changes to human influence. In: *Nature* 449 (7163): 710–712. DOI: 10.1038/nature06207.
- WILLIAMS, A. P., C. D. ALLEN, A. K. MACALADY, D. GRIFFIN, C. A. WOODHOUSE, D. M. MEKO, T. W. SWETNAM, S. A. RAUSCHER, R. SEAGER, H. D. GRISSINO-MAYER, J. S. DEAN, E. R. COOK, C. GANGODAGAMAGE, M. CAI & N. G. MCDOWELL (2013): Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. In: *Nature Climate Change* 3 (3): 292–297. DOI: 10.1038/nclimate1693.
- WILMOTH, J. M. (2006): Demographic Trends That Will Shape U.S. Policy in the Twenty-First Century. In: *Research on Aging* 28 (3): 269–288. DOI: 10.1177/0164027505285920.
- WILSON, E. (2006): Adapting to Climate Change at the Local Level. The Spatial Planning Response. In: *Local Environment* 11 (6): 609–625. DOI: 10.1080/13549830600853635.
- WITTE, J. C., A. R. DOUGLASS, A. D. SILVA, O. TORRES, R. LEVY & B. N. DUNCAN (2011): NASA A-Train and Terra observations of the 2010 Russian wildfires. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (17): 9287–9301. DOI: 10.5194/acp-11-9287-2011.
- WMO (World Meteorological Organization) (1983): Commission for climatology and applications of meteorology. Abridged final report of the eighth session. Washington, 19–30 April 1982. Genf (Supplement to WMO publication, 600).
- WMO (World Meteorological Organization) (2008): Urban flood risk management. A tool for integrated flood management. Associated programme on flood management (APFM Technical Documents, 11).
- WOLF, T. & G. MCGREGOR (2013): The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. In: *Weather and Climate Extremes* 1: 59–68. DOI: 10.1016/j.wace.2013.07.004.
- WOLF, T., G. MCGREGOR & A. ANALITIS (2009): Assessing Vulnerability to Heat Stress in Urban Areas. The Example of Greater London. In: *Epidemiology* 20: S24. DOI: 10.1097/01.ede.0000362249.11577.19.
- WONG, T. H. F. & R. R. BROWN (2009): The water sensitive city. Principles for practice. In: *Water Science & Technology* 60 (3): 673. DOI: 10.2166/wst.2009.436.
- YAHIA, M. W. & E. JOHANSSON (2014): Landscape interventions in improving thermal comfort in the hot dry city of Damascus, Syria—The example of residential spaces with detached buildings. In: *Landscape and Urban Planning* 125: 1–16. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.01.014.
- YANG, J. (2009): Assessing the Impact of Climate Change on Urban Tree Species Selection: A Case Study in Philadelphia. In: *Journal of Forestry - Washington-* 107 (7): 364–372. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/profile/Jun\\_Yang75/publication/233497862\\_Assessing\\_the\\_Impact\\_of\\_Climate\\_Change\\_on\\_Urban\\_Tree\\_Species\\_Selection\\_A\\_Case\\_Study\\_in\\_Philadelphia/links/5444c3dd0cf2a6a049ab21b8.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jun_Yang75/publication/233497862_Assessing_the_Impact_of_Climate_Change_on_Urban_Tree_Species_Selection_A_Case_Study_in_Philadelphia/links/5444c3dd0cf2a6a049ab21b8.pdf).

- YI, C., S.-M. AN, K. R. KIM, Y.-J. CHOI & D. SCHERER (2012): Improvement of air temperature analysis by precise spatial data on a local-scale – a case study of Eunpyeong New town in Seoul. In: *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15 (1): 144–158.
- YI, C., J.-H. EUM, Y.-J. CHOI, K. R. KIM, D. SCHERER, U. FEHRENBACH & G.-H. KIM (2011): Development of climate analysis Seoul (CAS) maps based on landuse and meteorological model. In: *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14 (1): 12–25.
- YIN, J., D. YU, Z. YIN, M. LIU & Q. HE (2016): Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China. In: *Journal of Hydrology* 537: 138–145. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.037.
- YOSHINO, M. (1990): Development of urban climatology and problems today. In: *Energy and Buildings* 15 (1-2): 1–10. DOI: 10.1016/0378-7788(90)90109-V.
- YUAN, F. & M. E. BAUER (2007): Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. In: *Remote Sensing of Environment* 106 (3): 375–386. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003.
- ZHANG, X. & X. CAI (2011): Climate change impacts on global agricultural land availability. In: *Environmental Research Letters* 6 (1): 14014. DOI: 10.1088/1748-9326/6/1/014014.
- ZHOU, Q., P. S. MIKKELSEN, K. HALSNÆS & K. ARNBJERG-NIELSEN (2012): Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. In: *Journal of Hydrology* 414–415: 539–549. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.031.
- ZIERL, B. (2001): A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. In: *Journal of Hydrology* 242 (1–2): 115–136. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00387-5.
- ZIMMERMAN, R. & C. FARIS (2010): Chapter 4. Infrastructure impacts and adaptation challenges. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1196 (1): 63–86. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2009.05318.x.
- ZISKA, L. H., D. M. BLUMENTHAL, G. B. RUNION, E. R. H. JR & H. DIAZ-SOLTERO (2011): Invasive species and climate change: an agronomic perspective. In: *Climatic Change* 105 (1-2): 13–42. DOI: 10.1007/s10584-010-9879-5.
- ZOLINA, O., C. SIMMER, K. BELYAEV, A. KAPALA & S. GULEV (2009): Improving Estimates of Heavy and Extreme Precipitation Using Daily Records from European Rain Gauges. In: *Journal of Hydrometeorology* 10 (3). DOI: 10.1175/2008JHM1055.1.
- ZOLINA, O., C. SIMMER, S. K. GULEV & S. KOLLET (2010): Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls. In: *Geophysical Research Letters* 37 (6). DOI: 10.1029/2010GL042468.
- ZOLINA, O., C. SIMMER, A. KAPALA, S. BACHNER, S. GULEV & H. MAECHEL (2008): Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. In: *Journal of Geophysical Research* 113 (D6). DOI: 10.1029/2007JD008393.
- ZOPPOU, C. (2001): Review of Urban Storm Water Models. In: *Environmental Modelling and Software* 16 (3): 195–231. DOI: 10.1016/S1364-8152(00)00084-0.

## Gesetzestexte

- BauGB: Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. September 2004 (BGBl. I S. 2414), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1722) geändert worden ist.
- ROG: Raumordnungsgesetz vom 22. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2986), das zuletzt durch Artikel 124 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.



## Anhang

**Tabelle 14: In der Arbeit verwendete Daten (eigene Darstellung)**

Verwendung	Klimawirkung	Datensatz		Format und räumliche Auflösung	Quelle
Stationsauswertung 1824-2015	-	DWD_OBS	Mittlere tägliche Lufttemperatur	Tabelle, punktgenau	Regionales Klimainformationssystem (ReKIS)
			Maximale tägliche Lufttemperatur		
			Minimale tägliche Lufttemperatur		
			Korrigierter Niederschlag		
			Potenzielle Verdunstung		
Stationsauswertung 2016-2100	-	STAR2, WETTREG2010	Mittlere tägliche Lufttemperatur		
			Maximale tägliche Lufttemperatur		
			Minimale tägliche Lufttemperatur		
			Korrigierter Niederschlag		
			Potenzielle Verdunstung		
Klimasignal Gegenwart	Wärmebelastung für die Bevölkerung	Maximale tägliche Lufttemperatur		Raster, 1.000 m	
	Trockenstress für die Vegetation	Mittlere tägliche Lufttemperatur			
		Korrigierter Niederschlag			
		Potenzielle Verdunstung			
	Überschwemmungen durch Starkregen	Sturzflutpotenzial			Thüringer Klimaagentur
Sensitivität Gegenwart	Wärmebelastung für die Bevölkerung	Flächenversiegelung		Vektor, 8-12 m	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG)
		Einwohner mit Hauptwohnsitz		Tabelle, statistischer Bezirk	Statistikstelle der Stadt Jena
		Einwohner mit Hauptwohnsitz: 0 bis 5 Jahre			
		Einwohner mit Hauptwohnsitz: ab 65 Jahre			
		Ausländer mit Wohnsitz in Jena			
		Einpersonenhaushalte: ab 60 Jahre			
		Leistungsempfänger von ALG II oder Sozialgeld			
	Trockenstress für die Vegetation	Ackerland (ATKIS-Basis-DLM)		Vektor, -	Stadt Jena (Statistikstelle), Jenarbeit
		Ortslage (ATKIS-Basis-DLM)			
		Hauptbaumarten auf Waldflächen			ThüringenForst
		Standorteigenschaften auf Waldflächen			
		Leitbodenformen (Bodengeologische Karte)			Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG)
Städtisches Baumkataster		KommunalService Jena (KSJ)			

Fortsetzung Tabelle 14

Verwendung	Klimawirkung	Datensatz	Format und räumliche Auflösung	Quelle
Sensitivität Gegenwart	Überschwemmungen durch Starkregen	Digitales Geländemodell (DGM)	Raster, 2 m	Thüringer Landesamt für Vermessung und Geoinformation (TLVermGeo)
		3D-Gebäudemodell (LoD1)	Vektor, -	
		Landnutzung (ATKIS-Basis-DLM)	Vektor, -	
		Leitbodenformen (Bodengeologische Karte)		Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG)
Klimasignal Zukunft	Wärmebelastung für die Bevölkerung	Maximum near-surface temperature (Tmax)	Diagramm, -	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI)
		Percentage of days when TX > 90th percentile (TX90p)		
	Trockenstress für die Vegetation	Net water flux (P-E)	Diagramm, -	
		Maximum length of dry spell (CCD)		
	Überschwemmungen durch Starkregen	Sturzflutpotenzial	Text, -	BRENDEL et al. (2014)
		Annual count of days when PRCP ≥ 20 mm (R20mm)	Diagramm, -	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI)
		Annual total PRCP when RR > 99p (R99pTOT)	Diagramm, -	
	Sensitivität Zukunft	Wärmebelastung für die Bevölkerung	Bevölkerungszahl	Tabelle, Gesamtstadt
Anteile der jungen Bevölkerung (bis 20 Jahre) und Senioren (ab 65 Jahre)				
Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche				
Trockenstress für die Vegetation				
Überschwemmungen durch Starkregen				
Zusatzinhalte Planungshinweiskarte	Wärmebelastung für die Bevölkerung	Einrichtungen mit besonders hitze-sensitiven Personengruppen (Seniorenheime, Kindertagesstätten und Krankenhäuser)	Vektor, punktgenau	Stadt Jena (Fachdienst Jugend & Bildung), Universitätsklinikum Jena
		Kaltluftleitbahnen (abgeleitet aus Kaltluftmodellierung mit KLAM 21)	Raster, 50 m	Deutscher Wetterdienst (DWD)
	Überschwemmungen durch Starkregen	Feuerwehreinsatzorte (abgeleitet aus Einsatzdaten 2009-2013)	Vektor, punktgenau	Stadt Jena (Fachdienst Feuerwehr)
		Straßen, Bahntrassen (ATKIS-Basis-DLM)	Vektor, -	Thüringer Landesamt für Vermessung und Geoinformation (TLVermGeo)
		Ackerland (ATKIS-Basis-DLM)		
		Ortslage (ATKIS-Basis-DLM)		
		Besonders erosionsgefährdete Abflussbahnen	Raster, 5 m	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG)



**Tabelle 15: Empfohlene Anpassungsmaßnahmen für die Klimawirkungen in der Planungshinweiskarte (verändert nach KURMUTZ et al. 2012)**

Maßnahme	Empfehlungsgruppe	Beschreibung
ENE-01	U3	Regenerative Energieerzeugung: Schnellumtriebwälder – auf landwirtschaftlichen Flächen – können der Biomasseproduktion dienen und die regionale Unabhängigkeit der Energieproduktion steigern. Zudem stellen sie einen lokalen Erosionsschutz dar.
FOR-01	T2	Brandschutz: Aufgrund des Temperaturanstiegs – und damit einhergehender Trockenperioden – wird die Waldbrandgefahr zunehmen, der durch entsprechendes Monitoring und einer erhöhten Einsatzbereitschaft zu begegnen ist.
FOR-03	T2	Information und Kommunikation: Qualifizierung der Beschäftigten, um das Bewusstsein für eine nachhaltige und naturschonende Forstwirtschaft zu fördern.
FOR-04	T2	Waldumbau: Die Waldbestände sind auf resiliente Baumartenzusammensetzungen (verstärkt Mischwald) und naturnahe Behandlungsmethoden hin zu verändern.
FOR-05	T2	Forstplanung: Durch die Ausweisung von Gefahrenzonen können frühzeitig forstwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen erfolgen.
FOR-06	U3	Forstplanung: Wald stellt eine Sicherung für Siedlungsflächen und Infrastrukturen in gefährdeten Gebieten (Steinschlag, Hangrutschung) sowie einen Erosionsschutz dar, daher ist an erforderlichen/ geeigneten Stellen eine (Wieder-) Bewaldung zu prüfen.
HUM-01	W1, W3	Thermische Entlastung: Erhalt von zusammenhängenden Grün- und Freiflächen als Luftaustauschbahnen mit stadtklimaverbessernder Wirkung.
HUM-02	W1, W3	Thermische Entlastung/ Frischluftzufuhr: Kaltluft- sowie Frischluftentstehungsgebiete (Wiesen, Felder, Wälder, Gartenland) sind insbesondere in stark verdichteten Räumen zu erhalten und in ihrer Entwicklung zu fördern.
HUM-03	W1, W2	Thermische Entlastung: Grüne Strukturen haben einen abkühlenden Effekt auf die urbane Umgebung und sollten vielfältig, auch kleinteilig (insbesondere in stark verdichteten Bereichen) im Stadtgefüge erhalten und vorgesehen werden.
HUM-04	W1	Lufthygiene: Erhalt und Entwicklung zusammenhängender Grün-, Garten- und Waldflächen. Sie bewirken eine Verbesserung der klimatisch-lufthygienischen Belastungssituation durch Filterung und Festlegen von Schadstoffen und Stäuben sowie durch Abkühlung der Lufttemperaturen. Gleichzeitig bieten sie als Naherholungsraum eine Rückzugsmöglichkeit bei Hitzestress.
HUM-05	W1, W2	Thermische Entlastung: Erhalt und Entwicklung von offenen Wasserflächen (blaue Strukturen). Sie haben eine ausgleichende Wirkung auf die Lufttemperatur, da Wasser sich im Vergleich zur Luft langsamer erwärmt und seine Verdunstung zur Abkühlung der aufgeheizten Innenstadtluft beiträgt.
HUM-06	W3	Lufthygiene: Insbesondere in klimatisch-lufthygienisch stark belasteten Bereichen ist auf eine Verringerung des Emissionsaufkommens, (v. a. der Verkehrsemissionen) hinzuwirken.
HUM-07	W2	Thermische Entlastung: In städtischen Konzepten und Planungen sollte immer wieder darauf verwiesen werden, dass eine Zunahme von Extremereignissen sowie Hitze- und Kältetagen zu einer Zunahme der Einsatzhäufigkeit der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) führen wird, dem durch angepasste Einsatzplanung begegnet werden muss.
HUM-08	W2	Thermische Entlastung: Die Bevölkerung, vor allem gesundheitlich exponierte Gruppen (Alte, Kinder, Kranke), ist über ein hitzeangepasstes Verhalten („richtige“ Bekleidung, ausreichende Flüssigkeitszufuhr, Aufenthalt im Freien) im Vorfeld längerer Hitzeperioden durch Medien und besondere Funktionsträger (Gesundheitsamt, Schulleitung, Betriebsleitung etc.) aufzuklären.

Fortsetzung Tabelle 15

Maßnahme	Empfehlungsgruppe	Beschreibung
HUM-09	W2	Gesundheitsrisiken allgemein: Auch das medizinische Personal muss über die zunehmenden Gefahren für die menschliche Gesundheit und geeignete Gegenmaßnahmen bzw. Verhaltensregeln durch fortlaufende Weiterbildung informiert werden.
HUM-10	W2	Thermische Entlastung: In städtischen Konzepten und Planungen sollte immer wieder darauf verwiesen werden, dass Alten- und Pflegeheime sowie Krankenhäuser sich mittels spezifischer Notfallpläne auf den in den Zeiten der Extremhitzetage auftretenden erhöhten Pflegebedarf der Patienten einstellen müssen.
HUM-13	W2	Gesundheitsrisiken allgemein: Die Bevölkerung muss an Extremhitzetagen bzw. zu ggf. veränderten Pollenflugzeiten gewarnt werden.
HUM-15	W2	Thermische Entlastung: Auf Grund der Zunahme der Extremhitzetage ist eine technische Optimierung und architektonische Anpassung von Gebäuden (insbesondere öffentlicher Gebäude wie Verwaltungsgebäude, Schulen, Kindergärten...) zu fordern.
HUM-16	W1, W2	Thermische Entlastung: Eine Erhöhung der Albedo (Rückstrahlung) von Gebäuden und befestigten Oberflächen fördert die nächtliche Abkühlung der Luft und spart Energie für die Kühlung ein.
HUM-17	W1	Thermische Entlastung: Eine Entsiegelung innerstädtischer Flächen ermöglicht die Verdunstung von Wasser aus Boden und Vegetation und wirkt somit der Ausbildung von Wärmeinseln entgegen.
HUM-20	W1	Thermische Entlastung: Die urbane Durchgrünung (z. B. durch Freiflächen, Straßenbegrünung, Dach-, Hof- und Fassadenbegrünung) sollte erhöht werden, um die Kaltluftbildung durch Verdunstung zu steigern und der Hitzezunahme entgegenzuwirken.
HUM-21	W3	Thermische Entlastung/ Frischluftzufuhr: Bestehende Kalt- und Frischluftbahnen sind zur Abmilderung der nächtlichen Hitzebelastung zu erhalten und ggf. auszuweiten. Die Beeinträchtigung durch Emissionsquellen und bauliche Querungen sollte vermieden werden (Brücken statt Dämme).
HUM-22	W2	Thermische Entlastung: Vor allem in stark verdichteten Bereichen – die ggf. nicht oder nur wenig entsiegelt werden können – stellen Dach-, Hof- und Fassadenbegrünungen eine geeignete Maßnahme zur lokalen Abkühlung dar.
HUM-23	W1, W3	Bei neuen Bebauungsvorhaben ist auf eine klimaangepasste Baustruktur (Baukörper sowie Siedlungsstruktur) zu achten.
HUM-24	W2	Thermische Entlastung: Markisen und Sonnensegel sind eine effektive und kostengünstige Möglichkeit zur Beschattung hitzebelasteter Gebäudefassaden oder Plätze, insbesondere wenn eine Beschattung durch Bäume schwer realisierbar ist.
HUM-26	T3, W1	Bepflanzung: Anpflanzen von widerstandsfähigen (Straßen-)Bäumen zur lokalen Verbesserung der Luftqualität.
HUM-28	W3	Thermische Entlastung: Um das Eindringen von Kalt- bzw. Frischluft in den Siedlungskörper zu verbessern, sollte, vor allem im Bereich von Kaltluftentstehungsgebieten, quer zur Strömungsrichtung orientierte Bebauung vermieden werden. Wo dies nicht möglich ist, sollte die Bebauung mit großen Abständen und niedrigen Höhen erfolgen.
HWA-03	U1, U3	Hochwasserschutz: Der Wasserrückhalt in der Fläche durch Grundstücksversickerung (entsprechend der geologischen Ausgangsbedingungen), Bodenentsiegelung, Dachbegrünung mindert das Ausmaß der Folgen von Hochwasser und Starkregen.
HWA-08	U2	Hochwasserschutz: Der Zunahme der Einsatzhäufigkeit von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) durch Extremereignisse muss durch Personalplanung und Einsatzmanagement begegnet werden.
HWA-10	U1	Hochwasserschutz: Ein naturnaher Ausbau von Fließgewässern (z. B. Rückbau von Verrohrungen, Aufweitung des Bachbetts, Deichrückverlegungen, Anbindung von Altarmen) ist ein wirksamer Beitrag zum Hochwasserschutz.

Fortsetzung Tabelle 15

Maßnahme	Empfehlungsgruppe	Beschreibung
HWA-11	U3	Hochwasserschutz: Zum Schutz gegen Hochwasserereignisse sollte in der Landwirtschaft möglichst wenig Bodenverdichtung erfolgen.
HWA-12	U3	Hochwasserschutz: Zum Schutz gegen Hochwasserereignisse sollten in der Landwirtschaft Flächen möglichst hangparallel bewirtschaftet werden.
HWA-16	U1	Hochwasserschutz: Zur Platzierung geeigneter Hochwasserabwehrmaßnahmen im Bereich von Vorflutern 2. Ordnung sind Hochwassermodellierungen (Fließwege) für gefährdete Stadtbereiche erforderlich.
LAN-01	U3	Erosionsschutz: Durch die Anlage von Hecken kann die Erosion des Oberbodens durch Wind und Regen abgemildert werden.
LAN-02	T1	Agrarplanung: Die Ausweisung von Risikostandorten und Gefahrenzonen soll der Landwirtschaft eine spezifische Anbauanpassung ermöglichen.
LAN-03	U3	Erosionsschutz: Durch bodenschonende Kulturtechniken (z. B. Direktsaat, pfluglose Bodenbearbeitung) kann die Erosion des Oberbodens vor allem im Winter (Winterdeckung) abgemildert werden.
LAN-04	U3	Erosionsschutz: Durch den Zwischenfruchtanbau kann die Erosion des Oberbodens vor allem im Winter abgemildert werden.
LAN-05	T1	Anbauverfahren: Um die Gefahr des Ernteausfalls durch Extremereignisse zu minimieren, sollte die Vielfalt der angebauten Nutzpflanzen erhöht werden.
LAN-07	T1	Anbauverfahren: Einsatz von Nutzpflanzen, die wenig Wasser benötigen, und nach Möglichkeit resistent gegen Schädlingsbefall, Hitze- und Trockenstress sind.
LAN-08	T1	Information und Kommunikation: Qualifizierung der Beschäftigten, um über Möglichkeiten nachhaltiger Landwirtschaft zu informieren. Unterstützung der Verhaltensänderung.
LAN-11	T1	Grundwasserregeneration: Die Grundwasservorkommen werden sich auf Grund zunehmender Sommertrockenheit weiter verknappen. Um die Feldberegnung zukünftig gewährleisten zu können, sollten Substitutionspotenziale genutzt und Maßnahmen zur verstärkten Grundwassererneuerung eingeleitet werden.
LAN-12	T1	Agrarplanung: Die Effizienz der Wassernutzung sollte durch eine Bewässerungsplanung gesteigert werden.
MAN-01	U2	Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe: Um die Reaktionszeit zu verkürzen und potentielle Gefährdungsorte identifizieren zu können, muss ein Risikomanagement betrieben werden (u. a. Rettungskräfte verstärkt in die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung der Anlagenbetreiber einbeziehen).
MAN-05	U2	Ertüchtigung baulicher Infrastruktur: Bauliche Anlagen müssen gegenüber der wahrscheinlichen Zunahme von Extremereignissen (Sturm, Hochwasser, Schnee...) an die gestiegenen Herausforderungen angepasst ausgeführt werden und technisch entsprechend vorbereitet werden.
MAN-07	U2	Ertüchtigung Entsorgungsinfrastruktur: Bei Neubau von Entsorgungsanlagen der Stadtentwässerung (Kanalnetze, Speicherbecken, Rückhaltebecken, Abführungssysteme) müssen diese auf ihre Kapazität hin überprüft und ggf. neu dimensioniert werden.
MAN-08	U1, U2	Ertüchtigung Verkehrsinfrastruktur: Um das Ausmaß von Starkregenereignissen zu minimieren, sollte der Straßenraum über eine V-förmige Gestaltung (bei Mischverkehrsflächen) verfügen.
MAN-09	U1	Ertüchtigung Entsorgungsinfrastruktur: Um das Ausmaß von Starkregenereignissen zu minimieren, sollten Notentwässerungswege definiert werden.
MAN-10	W1	Maßnahmen an Gebäuden: In neu aufzustellenden Bebauungsplänen sollen Dachbegrünungen bei Gebäuden festgesetzt werden.
MAN-12	W3	Grünflächenplanung: Flächen in Ausgleichsflächenpools und Maßnahmen von Ökokonten sollten stärker genutzt werden, um große zusammenhängende Entlastungsstrukturen (Kaltluftentstehungsgebiete und Kaltluftbahnen) zu schaffen.

Fortsetzung Tabelle 15

Maßnahme	Empfehlungsgruppe	Beschreibung
MAN-15	T3	Grünflächenpflege: Durch steigenden Nutzungsdruck sowie gleichzeitiger erhöhter Schadensanfälligkeit ergibt sich ein erhöhter Kontroll- und Pflegeaufwand von Grünflächen und Straßenbäumen.
MAN-16	T3	Grünflächenpflege: Die potenziell zunehmende Gefährdung von Pflanzen durch Schädlinge, Hitze- und Trockenstress erfordert eine lokal angepasste Auswahl neuer Arten bei Neuanpflanzungen bzw. Ersatzmaßnahmen.
MAN-19	T3	Trockenheit: Die Zunahme von trockenen Sommern erfordert ein häufigeres Bewässern öffentlicher Grünflächen.
MAN-20	T3	Trockenheit: Die Zunahme von trockenen Sommern erfordert eine Umstellung auf wassersparende Verfahren. (z. B. verstärkte Nutzung von Regenwasser durch Zuleitung zu Straßenbäumen)
MAN-21	T1, T2, T3	Trockenheit: Die Zunahme von trockenen Sommern erfordert eine Anpassung der Bepflanzung.
MAN-30	U3	Verkehrsinfrastruktur: Verkehrswege (v. a. kommunale Straßen und Schienenwege) sind gegen Schäden auf Grund von Extremereignissen zu schützen (z. B. Hangsicherung von Böschungen) und dauerhaft zu überwachen (z. B. Vermeidung von Unterspülung).
MAN-31	U2	Ertüchtigung Verkehrsinfrastruktur: Um das Ausmaß der Folgen von Starkregenereignissen zu minimieren, sollten bereits bei der Straßenplanung Abflussszenarien simuliert werden und die Kanalisationseinläufe entsprechend gesetzt werden.
MAN-32	U1	Ertüchtigung Entsorgungsinfrastruktur: Um das Ausmaß der Folgen von Starkregenereignissen zu mindern, sollten die Möglichkeiten der flächenhaften Regenwasserversickerung sowie Regenwassernutzung überprüft und forciert werden.

Im Rückeinband der Dissertation befindet sich die CD mit der *Planungshinweiskarte Klimaanpassung* in originaler Auflösung von 95 x 136 cm im PDF-Format.

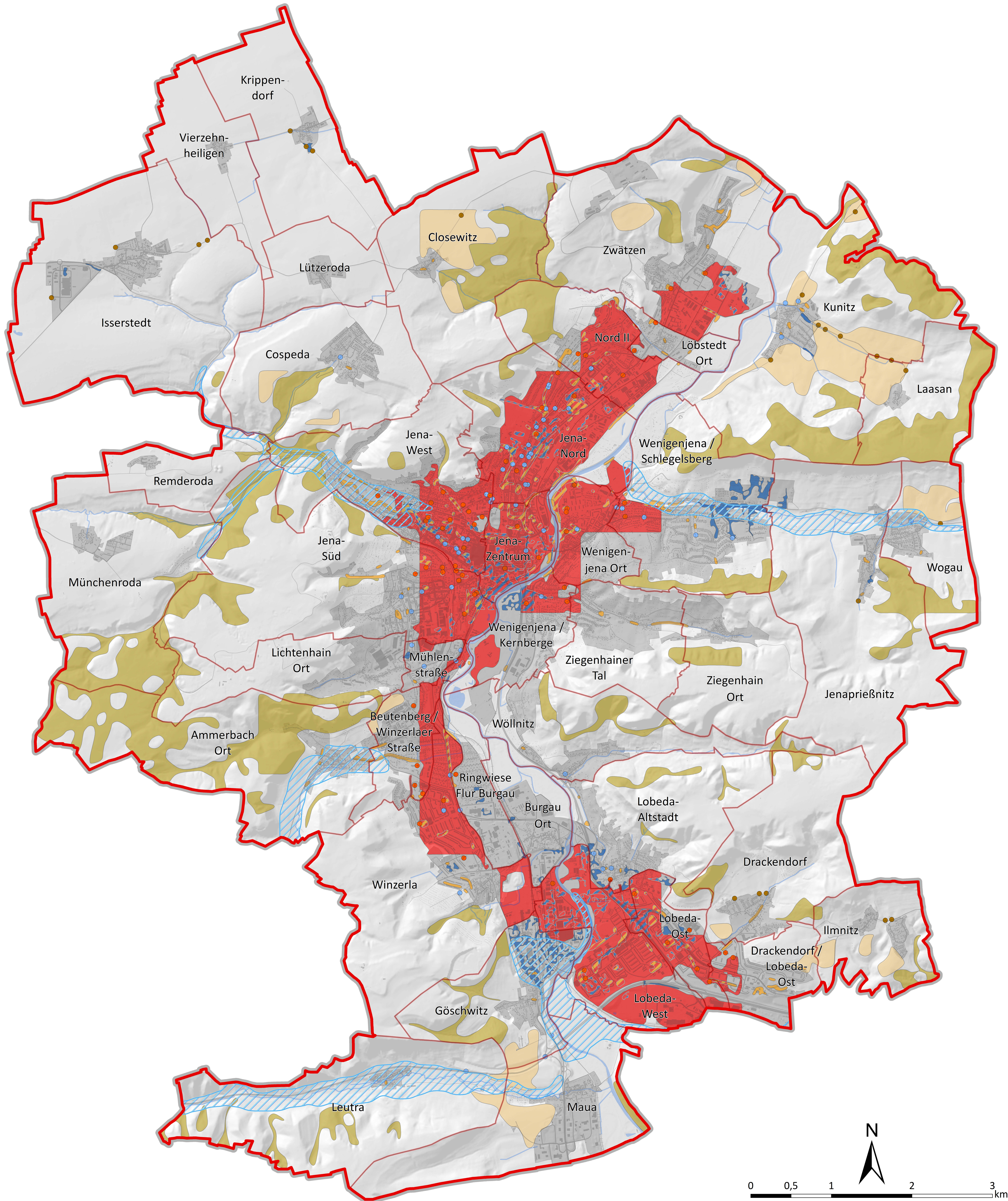
## Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen angefertigt habe.

Jena, den 08.12.2016

.....





# Planungshinweise zur Klimaanpassung für die Stadt Jena

Durch den projizierten Klimawandel werden sich bestehende Klimawirkungen weiter verschärfen. Die Umsetzung geeigneter Anpassungsoptionen kann die Klimawirkungen abschwächen und die Klimaresilienz der Stadt erhöhen. In der "Planungshinweiskarte Klimaanpassung" wurden auf Basis der einzelnen Analysen zur Klimawirkung die Bereiche mit überdurchschnittlich starker Klimawirkung zusammengefasst und Handlungsempfehlungen für die drei Klimawirkungen "Wärmebelastung für die Bevölkerung", "Trockenstress für die Vegetation" und "Überschwemmungen durch Starkregen" ausgewiesen, wie z. B. W1 oder T3. In Stadtbereichen mit verschiedenen sich überlagernden Klimawirkungen ergeben sich Handlungsempfehlungen mit mehreren Empfehlungsgruppen, wie z. B. W1/T3 oder T3/U1, die schraffiert in den Farben der zugrundeliegenden Klimawirkungen dargestellt sind. Zusätzlich wurden Empfehlungen für Flächen und Lokalitäten ausgesprochen, die im Zusammenhang mit den jeweiligen Klimawirkungen eine hohe Bedeutung besitzen, wie z. B. Bereiche mit wichtigen Kaltluftleitbahnen für die Klimawirkung "Wärmebelastung für die Bevölkerung". Die Karte besitzt Übersichtscharakter und zeigt u. a. idealisierte Grenzen klimatischer Sachverhalte mit möglichen Abweichungen zur Realität. Für tiefergehende Aussagen ist eine Detailuntersuchung angeraten.

Daten: Stadt Jena 2011/2013/2015, Jenarbeits 2014, Kommunalservice Jena 2014, DWD 2011, ReKIS 2014, TLUG 2014/2015, © GeoBasisDE / TLVermGeo 2014, ThüringenForst 2014. Die raumbezogenen forstlichen Daten für den Freistaat Thüringen werden mit Genehmigung von THÜRINGENFORST -Anstalt öffentlichen Rechts- genutzt.

Diese Karte ist ein Anhang zur Dissertation „Analyse der lokalen Auswirkungen des Klimawandels und Ableitung von Planungshinweisen für die Klimaanpassung am Beispiel der Stadt Jena“ von Diplom-Geograph Uwe Kurmütz.

### Klimawirkungen, Empfehlungsgruppen und Zielstellungen

(Für viele Bereiche der Stadt ergeben sich Kombinationen aus den grundlegenden Empfehlungsgruppen.)

#### Wärmebelastung für die Bevölkerung

W1

Wärmebelastung senken und Aufenthaltsqualität erhöhen

W2

Wärmebelastung senken, Informationslage verbessern und Gesundheitsvorsorge stärken

W3

Kalt-/Frischlufzufuhr erhalten, um Abkühlung in überwärmten Gebieten zu verbessern

#### Trockenstress für die Vegetation

T1

Artenwahl prüfen und anpassen, ggf. Wasserversorgung optimieren

T2

Artenwahl prüfen und anpassen sowie Waldbrand-Monitoring intensivieren

T3

Artenwahl prüfen und anpassen sowie Wasserversorgung optimieren

#### Überschwemmungen durch Starkregen

U1

Kanalsystem optimieren und Versickerung von Regenwasser verbessern

U2

Einsatzort monitorieren und ggf. künftig priorisieren; evtl. Kanalsystem optimieren

U3

Einsatzbereitschaft erhöhen, ggf. erosive Fließbahnen in Grünland umwandeln